

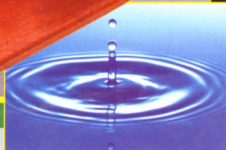
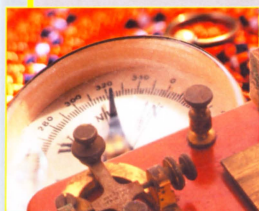
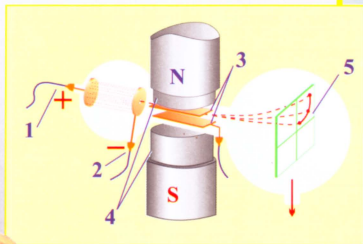
VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Большая Серия Знаний

ФИЗИКА

63

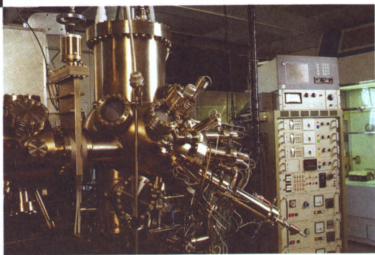
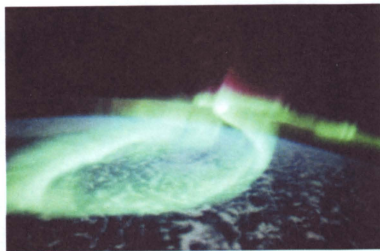
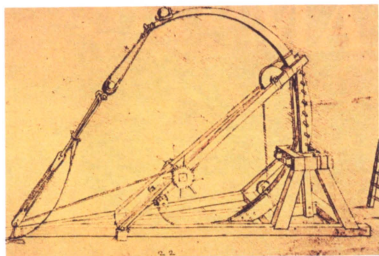




ФИЗИКА



Большая Серия Знаний



ФИЗИКА

Большая Серия Знаний



Москва 2006

Физика — наука, изучающая наиболее общие закономерности природы, строение и законы движения материи. Физические закономерности пронизывают всю нашу жизнь. Мы живем в огромном мире, подчиняющемся определенным законам. Эти законы существуют помимо человека — они были, есть и будут независимо от того, знаем мы о них или нет. Человечество же, в силу своей неумной жажды к познанию, всегда будет стремиться познать законы природы, с тем чтобы в дальнейшем применить их. На этом пути человека ждет много трудностей и преград, но, несмотря ни на что, пылкий человеческий разум все равно стремится приподнять завесу непознанного. Какие еще тайны скрываются за ней? Кто знает...



Охраняется законом РФ об авторском праве. Воспроизведение текста, части или иллюстраций без разрешения правообладателя запрещено и преследуется по закону.

ISBN 5-486-00370-6

© Брилев Д.В., 2003

© ООО «ТД «Издательство Мир книги», 2006

СОДЕРЖАНИЕ



ВЕЛИКОЕ ДЕРЕВО ФИЗИКИ 6

НЕМНОГО О МЕХАНИКЕ 11

МЕХАНИКА
МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ 12

КИНЕМАТИКА 12

ДИНАМИКА 15

СТАТИКА 18

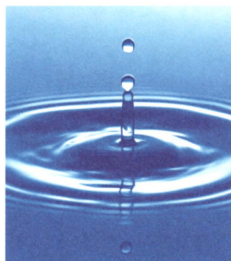
РАБОТА И ЭНЕРГИЯ 20

МЕХАНИКА
ТВЕРДОГО ТЕЛА 22

СИЛЫ УПРУГОСТИ 22

СИЛЫ ТРЕНИЯ 24





МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА 25

ГИДРОСТАТИКА 25

АЭРОСТАТИКА 28

ГИДРОДИНАМИКА И АЭРОДИНАМИКА 29

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА 33

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА 33

ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-
КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ 34

СВОЙСТВА ГАЗОВ 37

СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ 40

СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ 42

ТЕРМОДИНАМИКА 43

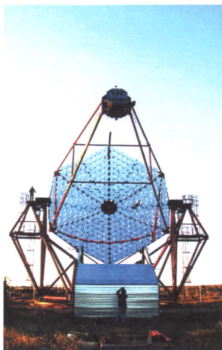
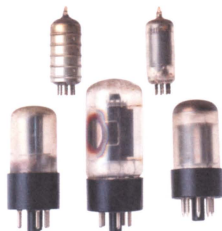
АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ 48



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО 53 И МАГНЕТИЗМ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО 53

МАГНЕТИЗМ 65



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ 71

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ 71

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ 80

ОПТИКА 87

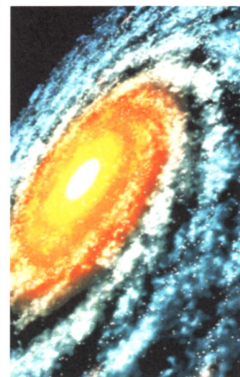
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА 87

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА 96



КВАНТОВАЯ ФИЗИКА 102

ПРИЛОЖЕНИЕ 124



Открыв старинные словари, можно многое узнать про то, что понимали под словом «физика» наши предки. Итак... ■

Физика есть наука о существе, свойствах, силах, действиях и цели всех видимых в свете тел. Как называются особенные части физики? Соматология, стихииология, метеорология, минералогия, химия, зоология и телеология. (Энциклопедия, или Краткое начертание наук и всех частей учения. Переведена с немецкого на русский И. Шуваловым. М., 1781 г.) ■

Красоту заката мы имеем возможность оценить благодаря потоку фотонов, попавших на сетчатку глаза...

ВЕЛИКОЕ ДЕРЕВО ФИЗИКИ

Физика — наука, изучающая наиболее общие закономерности природы, строение и законы движения материи. Физические закономерности пронизывают всю нашу жизнь. Мы живем в огромном мире, подчиняющемся определенным законам. Эти законы существуют помимо человека — они были, есть и будут независимо от того, знаем мы о них или нет. Человечество же, в силу своей неумной жажды к познанию, всегда будет стремиться познать законы природы, с тем чтобы в дальнейшем применить их. На этом пути человека ждет много трудностей и преград, но, несмотря ни на что, пылкий человеческий разум все равно стремится приподнять завесу непознанного. Какие еще тайны скрываются за ней? Кто знает...

Значение физики как науки в современном обществе практически невозможно переоценить. С одной стороны, достижения в области физических наук, получившие воплощение в разнообразных бытовых приборах, облегчают жизнь миллиардам людей. С другой — уровень развития этих наук определяет статус государства на мировой политической арене.

Законам, изучением которых занимается физика, подчиняется вся наша жизнь. Например, мы ходим благодаря силам тяготения и трения, способны мыслить благодаря тому, что по нашим нейронам передаются электрические импульсы, наслаждаемся красотой окружающего нас мира, не задумываясь о том, что это происходит вследствие попадания потока фотонов на сетчатку глаза. Словом, любое, даже самое простейшее, действие подчиняется тому или иному физическому закону. ■

Благодаря открытиям в области физики человек стал великим созидателем. Используя знание тех или иных





Корпус самолета-невидимки «Стелс» покрыт специальным составом, поглощающим лучи радара.

законов физики, мы можем заглянуть и в глубины Вселенной, и в фантастический мир микрочастиц, способны перемещаться на огромные расстояния за короткое время и за мгновения узнавать о событиях, произошедших за тысячи километров. Но не нужно забывать и о том, что, используя законы физики, человек способен стать и великим разрушителем — оплавленные здания Хиросимы и Нагасаки, сверхточные бомбардировки мирных городов с помощью самолетов-невидимок «Стелс», Чернобыльская катастрофа и другие трагедии яркое тому подтверждение. Но сама физика здесь ни при чем, она не бывает ни доброй, ни злой, и не ее вина, что порой научным открытием человек пользуется не как ключом, а как отмычкой. Именно человек делает выбор — созидать или разрушать, а физика только дает возможности для реализации его замыслов. ■

На заре цивилизации физические знания носили прикладной характер — никто и не думал заниматься чисто теоретическими исследованиями. На первом месте стояла проблема выживания, и поэтому были востребованы те знания, которые можно было сразу же воплотить в жизнь, существенно ее облегчая.

Возможно, начало физическим наблюдениям было положено еще в те далекие времена, когда наши предки носили звериные шкуры и охотились на мамонтов. Сложно сказать, понимали они связь между природными явлениями или нет. Но даже если и не понимали, они, тем не менее, эту связь использовали. К примеру, первобытные охотники столкнулись с тем, что чем дальше от них находится добыча, тем сильнее нужно бросать копые или камень, чтобы убить ее. А холодными зимними ночами они заметили, что шкуры разных животных согреваются по-разному, и т.д. Но для возникновения полноценной науки этого было мало, так как она начинается тогда, когда в нагромождении случайных фактов человек может выделять простые закономерности.

Именно поэтому величайшим достижением человеческого гения в древности можно считать изобретение колеса. Заметив, что тела круглого сечения, например бревно, если их толкнуть, перемещаются на большее расстояние, чем тела другой формы, человек избрал колесо. Так выделяя и перенося увиденную закономерность в область практической деятельности, человек открыл новую эру во взаимоотношениях с природой — эру осознанного использования физических законов. Открытие колеса дало мощнейший толчок к развитию человеческой цивилизации в целом. ■

Физика (греч. «природознание, естествознание») — наука, составляющая часть философии, имеющая своим предметом природу вообще и всех естественных тел, их свойств, явлений и взаимного друг на друга действия.

(Новый словотолкователь.
Составил Н.М. Яновский.
СПб, 1806 г.) ■

Изобретение колеса открыло новую эру во взаимоотношениях человека и природы...



Физика происходит от греческого слова «природа» и, как показывает само название, вообще означает учение о природе. В настоящее время употребляют слово «физика» в тесном значении и разумеют под ним науку, рассматривающую законы и причины явлений, не касающихся изменений внутреннего свойства материальных тел.

(Справочный энциклопедический словарь А. Старчевского — К. Крайя. СПб 1848 г.) ■

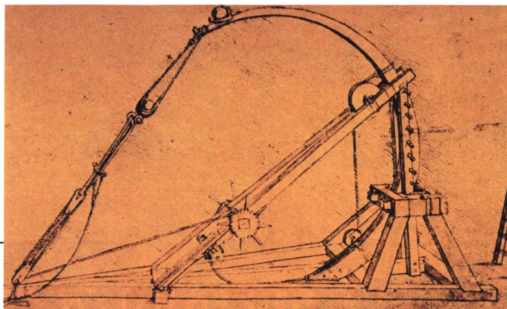
От древних цивилизаций (Древний Египет, Вавилон, Ассирия) не осталось достоверных свидетельств о каких-либо достижениях в области физических знаний. Наиболее ранние документальные подтверждения относятся ко времени развития древнего Китая и Индии. В этих культурах представления о физических законах появились на основе технической деятельности (строительство зданий и дворцов, сооружение каналов и дамб, создание военной техники). В первую очередь вырабатывались представления из области механики. Древнеиндийским мудрецом Канадой (что в переводе с санскрита означает «пожиратель атомов») высказывались предположения об атомном строении вещества. Но в то время знания о природных законах носили эмпирический (т.е. основанный только на наблюдениях) характер и не имели теоретического обоснования. ■

Теоретические основы физики были заложены в античные времена. Само слово «физика» — древнегреческого происхождения. Именно в Древней Греции сложилось учение об атомах, сохранившееся почти без изменений до XIX века. Его авторы, Левкипп и Демокрит, утверждали, что все вещи состоят из бесчисленных неделимых частиц, отличающихся друг от друга величиной и формой. Атомистическая концепция исходила из признания пустоты (языком современной физики — вакуума), принципов сохранения материи (ничто не может возникнуть из ничего) и сохранения форм материи (природа все разлагает на тела и в ничто ничего не переводит, т.е. в природе постоянно повторяются одни и те же формы материи).

Потребность в создании различных технических устройств (военных и строительных) создала благоприятную почву для развития прикладных аспектов физической науки. В Древней Греции получил теоретическое обоснование принцип рычага, позволяющий перемещать в пространстве тела большого веса при относительно небольших усилиях. Архимед, создав теорию рычага, заложил основы целого раздела механики — статики. ■

Все это время физика являлась составной частью философии и не рассматривалась как отдельная наука. Выделение физики из философии началось в средние века, а окончательное превращение ее в самостоятельную науку обычно связывается с именем Галилео Галилея (1564—1642). Именно он считается родоначальником экспериментальной физики. До него физические концепции носили скорее умозрительный характер, и им не доставало доказательности. Галилей же су-

Необходимость в создании мощных осадных орудий сыграла свою роль в развитии физики.



мел объединить и ввести в физику эксперимент и точный математический анализ, чем во многом определил дальнейшее развитие физической науки. Используя экспериментально-математический метод, Галилео Галилей заложил основы современной механики и открыл ряд ее фундаментальных законов.

Важность работ итальянского ученого по созданию экспериментально-математического метода в том, что наука в состоянии познать только те явления, свойства которых можно оценить числом. Поэтому именно с введения этого метода можно называть физику собственно наукой.

Достижения Галилея и его современников (Кеплера, Декарта, Гюйгенса) подготовили почву для работ Исаака Ньютона (1643—1727), ставшего основателем теоретической физики. Именно его исследования положили начало так называемому «классическому» периоду в развитии физической науки.

Ньютон сформулировал три закона движения и вывел из них ряд следствий, трактованных прежде как самостоятельные законы. Его трактат «Математические начала натуральной философии» подвел итоги работы, начатой Галилеем, по установлению смысла и количественных характеристик таких основных понятий механики, как пространство, время, масса, количество движения, сила. Для решения

задач, связанных с движением, ученый применял созданные им (вместе с Лейбницем) дифференциальное и интегральное исчисления, ставшие впоследствии одним из самых мощных математических средств физики. Результатом развития физической концепции Ньютона явилось создание единой механической картины мира, в которой все многообразие природных явлений объяснялось различиями в движении тел, подчиняющихся законам ньютоновской механики. ■

Впервые теоретические воззрения Ньютона были подвергнуты пересмотру Майклом Фарадеем и Клерком Максвеллом. В первой половине XIX века Фарадей провел свой, ставший классическим, опыт: поднес к медной катушке магнит и вызвав в ней электрический ток, он сумел пронаблюдать преобразование механической работы в электрическую энергию. Теория Ньютона не смогла объяснить движение электрически заряженных частиц, взаимодействующих друг с другом через пустое пространство под влиянием электрических и магнитных сил. Это было связано с различиями между гравитационными силами, описываемыми в ньютоновской механике, и электромагнитными. Из-за этих отличий вместо понятия «сила» Д.К. Максвеллу потребовалось ввести более сложное понятие «поле», не имевшее соответствия в классической механике.

Именно с работами Максвелла связан новый этап в развитии физики — этап «классической электродинамики». Максвелл определил электромагнитную природу света, и оптику стали рассматривать как часть электродинамики. Открытие Д.К. Максвеллом электромагнитного поля и законов его распространения стоит на одном уровне с открытием Исааком Ньютоном закона всемирного тяготения. ■



Современные телескопы-рефлекторы являются потомками телескопа, изобретенного Исааком Ньютоном в 1668 году.

Физика (греч. слово), наука или учение о природе (греч. *physis*) — в настоящее время учение о законах явлений, происходящих в неодушевленной природе, помимо химических превращений, происходящих в телах.

(Большая энциклопедия. Словарь общедоступных сведений по всем отраслям знания. Под ред.

С.Н. Южакова. СПб, 1905 г.) ■

Физика — наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи и законы ее движения. Понятия физики и ее законы лежат в основе всего естествознания. Физика относится к точным наукам и изучает количественные закономерности явлений. Границы, отделяющие физику от других естественных наук, в значительной мере условны и меняются со временем.

(Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983 г.) ■

У истоков величайшего переворота в физике в начале XX века находилась плеяда выдающихся ученых — Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри, Э. Резерфорд, М. Планк, А. Эйнштейн, Н. Бор и многие другие. Именно они полностью изменили существующее ранее в физике представление об окружающем мире. С появлением планетарной модели атома Резерфорда-Бора, общей и специальной теорий относительности А. Эйнштейна, квантовой физики М. Планка начался новый, революционный этап в развитии физики, позднее названный «неклассическим». Революционным его называют потому, что за короткий срок буквально все физические концепции были подвергнуты пересмотру. С развитием квантовой физики пришло более глубокое понимание того, что вопрос о сущности явлений лежит вне физики и не может быть разрешен ее средствами. Данная наука изучает только законы, по которым эти явления происходят, — не более. ■

Современная история науки выделяет три этапа научной революции, произошедшей в XX веке. Первый этап продолжался с 1895-го по 1916 год. Для него характерны исследования новых областей физики, создание новых теорий, главным образом силами ученых-одиночек. Это период в основном индивидуальных достижений супругов Кюри, Резерфорда и др. Физические исследования ведутся в университетских лабораториях, они слабо связаны с промышленностью, используемая аппаратура дешева и проста.

Второй этап (1919–1939 гг.) характеризуется массовым внедрением промышленных методов и организованности в физические исследования. Отдельные крупные ученые начинают возглавлять научные группы и устанавливать связи с крупными промышленными исследовательскими лабораториями. Растет число ученых. Начинается военное использование физических знаний и установление связи между руководителями физических исследований с промышленными и государственными организациями в военных целях.

Третий этап характеризуется еще большим расширением участия физики в военных программах. Физические исследования становятся все более дорогостоящими, в их организации все большую роль играет государство. Именно в это время создаются атомная и водородная бомбы. ■

Физика, как наука, имеет достаточно сложную структуру. В нее включаются различные разделы. В целом физика разделяется на **теоретическую** (ориентированную на формулировку физических законов, объяснение на основе этих законов природных явлений) и **предсказание новых явлений**) и **экспериментальную** (имеющую дело с проведением экспериментов с целью установления новых фактов и проверки гипотез и известных физических законов).

Иногда физику представляют в виде дерева, в нижней части ствола которого находятся классическая физика, электродинамика и физика теплоты вместе с широко раскинувшимися ветвями, символизирующими обширные приложения этих направлений. Выше по стволу расположена атомная физика с такими ее ветвями, как современная химия, материаловедение, электроника и оптика. Еще выше обосновалась ядерная физика с ее молодыми ветвями, символизирующими науку о радиоактивности и астрофизические приложения. На вершине, где пока нет ветвей, помещаются современные физика элементарных частиц и космология. ■

НЕМНОГО О МЕХАНИКЕ

Механика, так же как математика и астрономия, относится к числу древнейших наук. Механика изучает общие законы механического движения материальных тел и устанавливает общие приемы и методы решения вопросов, связанных с этим движением. То есть, проще говоря, механика изучает движение. Мы же, в нашей повседневной жизни, постоянно сталкиваемся с движением тел. В космическом пространстве движутся солнечные системы и галактики, звезды и планеты, космические корабли и искусственные спутники Земли. Двигаются молекулы и атомы, электроны и протоны, α -частицы и фотоны. Практически все физические явления сопровождаются движениями тел.

Основоположником механики как точной науки следует считать Архимеда (287–212 гг. до н.э.), древнегреческого ученого и философа. Именно он заложил основы таких разделов механики, как статика и гидростатика, создав учение о центре тяжести и открыв закон о давлении жидкости на погруженное в нее тело.

Зарождение другого раздела механики — динамики — связывают с именем великого итальянского ученого Галилео Галилея (1564–1642). Он первым доказал, что под действием постоянной силы тело будет двигаться равноускоренно, а не равномерно, как полагали со времен Аристотеля. Кроме того, Галилей сформулировал закон инерции, экспериментально установил закон падения тел в пустоте, решил задачу о движении тела, брошенного под углом к горизонту, изобрел телескоп и совершил множество других открытий. Развивая идеи Галилео Галилея и ряда других ученых (Кеплера, Декарта, Гюйгенса), великий английский физик Исаак Ньютон (1643–1727) дал точную формулировку второму закону механики и открыл такие законы классической механики, как закон равенства действия и противодействия и закон всемирного тяготения. Также он уточнил закон инерции, открыт Галилеем, и ввел понятие массы. ■

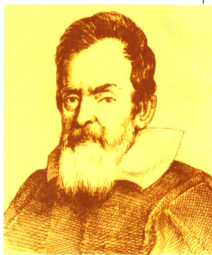
Классическая механика Ньютона почти без изменений просуществовала до конца XIX века. Но в связи с тем, что она не могла описать движение микрочастиц, а также тел, имеющих скорости, близкие к скорости света, Альберт Эйнштейн вынужден был создать свою знаменитую теорию относительности.

Для лучшего понимания законов механики необходимо рассмотреть два вида физических величин, существенно отличающихся друг от друга.

Такие величины, как температура, время, масса, плотность, площадь, объем и т.д., можно охарактеризовать при помощи чисел. Единственным условием является необходимость выбора единицы измерения. Так, например, чтобы охарактеризовать массу какого-либо предмета, достаточно измерить ее в килограммах (либо в фунтах и т.п.). Полученное число даст нам значение массы. Подобные величины носят название скалярных.

Для характеристики других величин, помимо их численного значения, нужно знать и направление. Такими величинами являются сила, скорость, ускорение и т.д. Они носят название векторов. ■

Термин «механика» впервые был введен великим древнегреческим философом Аристотелем (384–322 гг. до н.э.) и происходит от греческого слова «механэ» — «ухищрение, машина, приспособление». ■



Галилео Галилей (1564–1642).

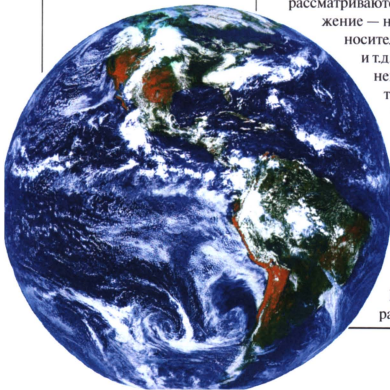
Величины, определяемые одним своим численным значением, называются **скалярными величинами** или просто **скалярами**.

Величины, определяемые не только своим численным значением, но и направлением в пространстве, называются **векторными величинами** или просто **векторами**. ■

Материальная точка — тело, размерами и формой которого в рассматриваемых условиях движения можно пренебречь. Например, пассажирский авиалайнер с двумястами пассажирами на борту, летящий на высоте нескольких километров, при наблюдении с Земли можно рассматривать как материальную точку. Хотя сами пассажиры самолета с такой постановкой вопроса вряд ли согласились бы. ■

Любое движение тела можно отнести к двум основным видам: поступательное и вращательное. **Поступательным** движением тела называется такое движение, при котором всякая прямая, связанная с этим телом, движется, оставаясь параллельной своему начальному положению. **Вращательным** движением называется такое движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения, а точки, лежащие на этой оси, остаются неподвижными. ■

Движение Земли вокруг своей оси, благодаря которому мы наблюдаем смену дня и ночи, является вращательным.



МЕХАНИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

КИНЕМАТИКА

Кинематикой называется раздел механики, изучающий геометрические законы движения тел без учета их масс и действующих на них сил.

Для лучшего понимания сущности кинематики важно помнить, что кинематика полностью основана на положениях геометрии и отличается от нее тем, что, кроме расстояния, пройденного движущимся телом, рассматривает еще и время, за которое совершается движение. ■

Механическое движение материального тела можно наблюдать и изучать лишь по отношению к каким-либо другим телам. Само понятие движения приобретает смысл только тогда, когда речь идет об изменении положения тела в какой-либо системе координат. Например, человек, едущий в автомобиле, относительно самого автомобиля не совершает движения, тогда как относительно дороги он движется, да еще как движется (например, гонки Формулы-1). ■

Всякое тело в природе находится в состоянии движения, хотя нам порой кажется, что оно в состоянии покоя. Это связано с тем, что понятия «движение» и «покой» являются относительными и имеют смысл только при указании системы отсчета, относительно которой они рассматриваются. Даже, казалось бы, неподвижное тело совершает движение — например, относительно Солнца (вместе с Землей) или относительно центра галактики (вместе с Солнечной системой) и т.д. Поэтому невозможно установить какую-либо абсолютно неподвижную систему отсчета. По этой причине в кинематике не существует систем отсчета, более предпочтительных, чем другие. При решении разнообразных задач выбор системы отсчета определяется соображениями удобства (целесообразности).

Так как движение относительно, то и траектория будет зависеть от выбора системы отсчета. Например, камень, брошенный вертикально вверх на палубе равномерно движущегося теплохода, упадет на то же место и по отношению к палубе движется, соответственно, по прямой. Для наблюдателя же, стоящего на берегу, он движется по кривой (параболе).

В зависимости от характера траектории движение подразделяется на прямолинейное и криволинейное. Движе-

ние точки называется **прямолинейным**, если ее траектория — прямая линия, и **криволинейным**, если траектория — кривая линия.

Таким образом, все механические движения можно свести к нескольким основным видам: равномерное прямолинейное, равномерное криволинейное, неравномерное прямолинейное и неравномерное криволинейное. ■

Как мы уже упоминали, кинематика отличается от геометрии наличием такой характеристики, как время. Поэтому возникла необходимость описать связь между перемещением тела и временем. Именно как характеристика этой связи возникло одно из основных понятий кинематики — скорость. Для того чтобы лучше понять сущность этого понятия, можно просто рассмотреть его синонимы, существующие в русском языке. Таким синонимом является слово «быстрота». Например, мы говорим: «гепард — самое быстрое животное на планете...» или «“Мерседес” быстрее “Жигулей”...» и т.д. Подобные выражения, по сути, означают, что определенное

материальное тело имеет более высокую скорость, чем другие тела. То есть оно (тело) за одинаковый промежуток времени проходит большее расстояние.

Таким образом, **скоростью** равномерного движения называют отношение пути $\bar{S}$, пройденного телом, к промежутку времени t , за который этот путь пройден (рис.1):

$$\bar{v} = \frac{\bar{S}}{t}$$

Как мы видим, скорость является векторной величиной. Но в связи с тем, что в реальных условиях движение тела никогда не бывает строго равномерным, потребовалось ввести новую характеристику движения — ускорение. По

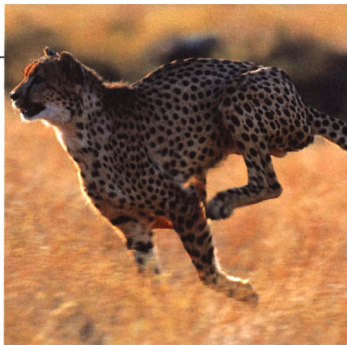
своей сути, ускорение отражает быстроту изменения вектора скорости как по модулю, так и по направлению:

$$\bar{a} = \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t},$$

где $\Delta \bar{v}$ — изменение вектора скорости за промежуток времени Δt .

Таким образом, рассмотрев скорость и ускорение для поступательного движения, мы можем перейти к рассмотрению более сложных понятий скорости и ускорения при вращательном движении. Величина, характеризующая быстроту вращения твердого тела, называется его **угловой скоростью** и находится по формуле:

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta \bar{\phi}}{\Delta t},$$



Из всех живых существ на Земле гепард развивает во время бега самую высокую скорость.

Мгновенной скоростью поступательного движения называется отношение очень малого перемещения $\Delta \bar{s}$ к малому промежутку времени Δt , за который произошло это перемещение:

$$\bar{v} = \frac{\Delta \bar{s}}{\Delta t}. \blacksquare$$

Скорость выражается в метрах в секунду:

$$\frac{1\text{ м}}{1\text{ с}} = 1\text{ м/с}.$$

Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м. **Метр** является единицей длины и равен расстоянию, которое свет проходит в пустоте за 1/299 792 458 долю секунды.

Секунда — единица времени, равная 1/86 400 доле суток. ■

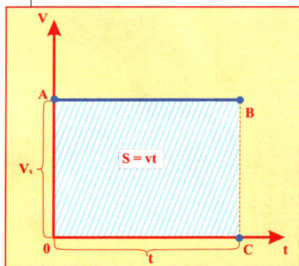


Рис. 1. График равномерного движения. Путь, пройденный телом, равен площади заштрихованной области.

Самым простым видом не-равномерного движения является **равноускоренное** движение, имеющее ускорение, постоянное по модулю и направлению. Скорость равноускоренного движения находится по формуле:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t,$$

где $\vec{v}_0$ — начальная скорость тела, $\vec{a}$ — ускорение, $\vec{v}$ — скорость в момент времени t (рис. 2). ■

Рис. 2. График равноускоренного движения.

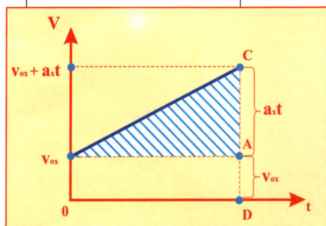


Рис. 3. Движение точки по окружности, где $\vec{v}$ — скорость точки, $\vec{a}$ — центростремительное ускорение, R — радиус окружности, φ — угол поворота тела относительно центра описываемой им окружности.

где $\Delta\varphi$ — приращение угла поворота тела за некоторый промежуток времени Δt .

Величина, характеризующая быстроту изменения угловой скорости тела, называется его **угловым ускорением** $\vec{\epsilon}_{\text{сп}}$, определяется по формуле:

$$\vec{\epsilon}_{\text{сп}} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t},$$

где $\Delta\vec{\omega}$ — приращение угловой скорости тела за промежуток времени Δt . Особый интерес для практической деятельности человека представляет один из самых простых видов криволинейного движения — равномерное движение по окружности. Особенностью этого движения является то, что значение скорости остается постоянным, а направление вектора скорости изменяется в процессе движения. Ускорение также имеет постоянное значение по модулю, тогда как направление вектора со временем меняется. Ускорение при равномерном движении по окружности носит название **центростремительного** и определяется по формуле:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}^2}{R},$$

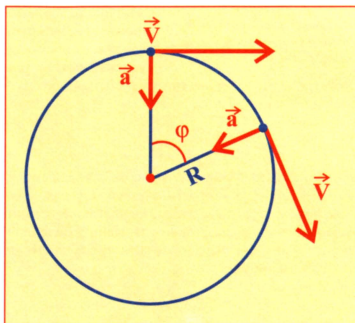
где R — радиус окружности (рис. 3).

Промежуток времени, за который тело совершает полный оборот при движении по окружности, принято называть **периодом**. При нахождении значения периода используют следующую формулу:

$$T = \frac{2\pi R}{v}.$$

Еще одной характеристикой движения по окружности является величина, обратная периоду обращения — **частота** обращения ν , и определяется она по формуле:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi R}. \blacksquare$$



ДИНАМИКА

Понятие динамики. Как уже было сказано ранее, основы динамики как самостоятельного раздела механики заложил Галилео Галилей, а после дополнил Исаак Ньютон. Вклад Ньютона был столь значителен, что и доньше три основных закона динамики принято называть его именем.

Динамикой называется раздел механики, изучающий зависимость между механическим движением тел и действующими на них силами. В отличие от кинематики, где рассматривается только геометрическая сторона движения, в динамике любое механическое движение рассматривается в связи с физическими факторами, определяющими характер этого движения, т.е. изучаются **причины** движения.

Понятие силы мы получаем из нашей повседневной жизни. Для того чтобы выполнить любое, даже самое простое, действие, нам нужно совершить усилие. Количественной мерой такого усилия и будет сила. То есть, говоря научным языком, **силой** называется мера такого действия одного тела на другое, в результате которого тело изменяет свое механическое состояние. Если это изменение выражается в изменении скорости тела, то имеет место так называемое **динамическое** проявление силы. Если же происходит деформация — то **статическое**. В механике сила является векторной величиной и определяется тремя составляющими: точкой приложения силы, направлением силы и численным значением (модулем) силы. ■

Законы классической механики. Сформулированные Исааком Ньютоном три закона механики лежат в основе динамики. Непосредственно их можно применять к простейшему случаю движения, когда движущееся тело рассматривается как материальная точка. При этом необходимо отметить тот факт, что в динамике имеют дело с инерциальными системами координат, характеризующимися тем, что относительно них материальная точка движется с постоянной скоростью.

Закон инерции впервые был установлен и опубликован в 1632 году Галилео Галилеем для случая горизонтального движения: когда тело движется по горизонтальной плоскости, то его движение является равномерным и продолжалось бы постоянно, если бы плоскость простиралась в пространстве без конца.

Ньютон же дал более общую формулировку закону инерции как первому закону движения. ■

Первый закон Ньютона (закон инерции). Существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущиеся тела сохраняют свою скорость постоянной, если на них не действуют другие тела (иными словами, относительно инерциальной системы координат свободное тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения).

Однако установить инерциальную систему координат с абсолютной точностью невозможно, так как не существует такого объекта, на который не действуют другие тела. Поэтому всегда нужно учитывать, что понятие инерциальной системы координат является абстракцией, которая используется (как и любое абстрактное понятие) в применении к физическим объектам с определенной степенью точности. ■

В динамике решается множество задач, но все они могут быть сведены к двум основным:

— Известно движение данного тела. Требуется определить силы, действующие на это тело.

— Известны силы, действующие на данное тело. Требуется определить движение этого тела. ■



Исаак Ньютон (1643–1727).

Свойство тела сохранять свою скорость при отсутствии взаимодействия с другими телами называется инертностью (от латинского *inertia* — бездеятельность, косность). Мерой инертности тела в поступательном движении является масса. ■

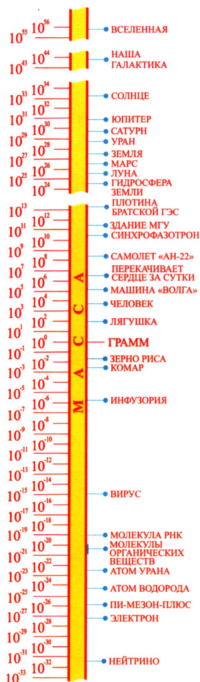


Рис. 4. Шкала соотношения масс различных объектов.

Второй закон Ньютона (основной закон динамики). Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Иначе говоря, произведение массы тела m на его ускорение $\vec{a}$ равно действующей силе, а направление ускорения совпадает с направлением силы.

В свое время Ньютон сформулировал его несколько иначе: изменение количества движения пропорционально приложенной действующей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует. Смысл этого закона заключается в том, что действующие на тело силы определяют изменение скорости тела, а не скорость движения тела.

Как мы видим, во втором законе Ньютона появляется новое понятие, до того в физике не встречающееся, — понятие массы. Из опыта нашей повседневной жизни мы знаем, что для того, чтобы передвинуть на определенное расстояние, к примеру, холодильник, нужно приложить гораздо больше усилий, чем когда мы на то же самое расстояние перемещаем мусорное ведро. И если бы мы ту силу, которую потребовалось приложить для перемещения холодильника на два метра, приложили к мусорному ведру, то ее хватило бы на то, чтобы несколько раз вынести мусор, да еще и осталось на прочие мелкие работы по дому. Одна и та же сила сообщает различным телам неодинаковые ускорения. Т.е. ускорение зависит не только от силы, действующей на тело, но и от какого-то свойства самого тела. Это свойство и характеризуется физической величиной, называемой **массой** (от латинского *massa* — глыба, ком, кусок). Масса является одной из трех основных величин, характеризующих механическое движение тела. Масса тела, содержащаяся в единице объема, называется **плотностью** и находится по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где V — объем тела.

Так же как и первый закон Ньютона, второй выполняется только в инерциальных системах отсчета. Из него следует, что независимо от того, находилось ли тело в покое, или двигалось, изменение скорости его движения может происходить только при действии силы, т.е. в результате взаимодействия с другими телами.

Произведение силы на время ее действия называется **импульсом силы**. Сущность этого понятия заключена в самом слове (в переводе с латыни «импульс» означает «толчок»). Определяется импульс по формуле:

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0,$$

где $\vec{v}_0$ — начальная скорость тела с массой m , а $\vec{v}$ — конечная.

С понятием импульса силы тесно связано понятие импульса тела (количества движения) как величины, одинаково изменяющейся у всех тел под действием одинаковых сил при одинаковом времени действия силы. **Количеством движения** материальной точки называется физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения. Импульс тела является количественной характеристикой поступательного движения тел. ■

Третий закон Ньютона (закон равенства действия и противодействия). Тела действуют друг на друга с силами, направленными

вдоль одной прямой, равными по модулю и противоположными по направлению (действию всегда есть равное и противоположное противодействие):

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Ньютон распространил действие этого закона и на случай столкновения тел, и на случай их взаимного притяжения. Как и предыдущие два закона, этот закон выполняется только в инерциальных системах отсчета.

В неинерциальных системах отсчета ситуация иная. При ускоренном движении неинерциальной системы координат относительно инерциальной системы первый закон Ньютона (закон инерции) в этой системе не имеет места — свободные тела в ней будут с течением времени менять свою скорость движения. В неинерциальных системах отсчета второй закон Ньютона можно сохранить, но для этого надо вводить силы инерции. ■

Закон всемирного тяготения. Одним из важнейших открытий Ньютона является закон всемирного тяготения. В повседневной жизни мы практически не обращаем внимания на проявления этого закона, так как наблюдаем их с самого детства — например, падение предметов как раз и является одним из проявлений закона тяготения. И поэтому с большей очевидностью мы осознаем гениальность Ньютона, который в обыденности явления сумел разглядеть закономерность, по которой живет все мироздание. Ведь яблоки падали веками (подразумевается анекдотичный случай, связанный с открытием закона всемирного тяготения), но именно Исаак Ньютон стал тем человеком, который увидел в этом нечто большее, чем просто свидетельство того, что пришла пора собирать урожай фруктов.

Значение силы тяготения в нашем мире очень велико. Если бы не было этой силы, то планеты не обращались бы вокруг своих светил, а одиноко и безжизненно неслись в межзвездной пустоте. Силе тяготения подчиняются приливы и отливы. Есть и неприятные аспекты этой силы. Так, например, жители Помпеи в полной мере ощутили на себе разрушительные последствия силы всемирного тяготения — ведь активизация вулканической деятельности связана с теми же приливами, но только в подземном океане магмы.

Задавшись вопросом о зависимости силы тяжести и ускорения свободного падения от расстояния до Земли, Исаак Ньютон пришел к формулировке закона всемирного тяготения, который гласит, что все тела притягиваются друг к другу и что сила всемирного тяготения прямо пропорциональна произведению масс тел и обратно пропорциональна квадрату расстояний между ними:

$$F_T = G \frac{m_1 m_2}{R^2},$$

где m_1 — масса одного тела, m_2 — масса второго тела, R — расстояние между ними, G — коэффициент пропорциональности, называемый **гравитационной постоянной**.

Силой всемирного тяготения Ньютон называл силу взаимного притяжения, действующую между Солнцем, планетами, кометами, звездами и другими телами во Вселенной.

Силы всемирного тяготения называют **гравитационными** силами, и они являются одним из четырех фундаментальных физических взаимодействий (остальные три — электромагнитное, слабое и сильное). ■

Падение тел на Землю в пустоте (в безвоздушном пространстве, где отсутствуют силы сопротивления воздуха) называется **свободным падением тел**. Свободное падение является равноускоренным движением.

Ускорение, с которым падают на Землю тела в пустоте, называется **ускорением свободного падения**, обозначается буквой g , и у поверхности земного шара его модуль равен примерно $9,8 \text{ м/с}^2$.

Сила притяжения, действующая со стороны Земли на все тела, называется **силой тяжести**:

$$\vec{F}_T = m\vec{g} \quad \blacksquare$$



Извержения вулканов часто являются следствием подземных приливов.

Статика базируется на первом и третьем законах Ньютона, а также на ряде принципов, выработанных опытным путем в течение тысячелетий. Вот некоторые из них:

1. Совокупность сил, действующих на данное тело, называется **системой сил**.
2. Если под действием системы сил свободное тело не изменяет своего движения или продолжает оставаться в покое, то такая система сил называется **уравновешенной системой**. Под свободным телом понимается тело, которому можно сообщить любое перемещение в пространстве.
3. Сила, которая, будучи присоединена к некоторой системе сил, действующих на тело, приводит систему к равновесию, называется **уравновешивающей** данной системы сил.
4. Две системы сил называются **эквивалентными**, если они оказывают одинаковое механическое действие на одно и то же свободное твердое тело.
5. Одна сила, эквивалентная данной системе сил, называется **равнодействующей** этой системы.
6. Силы, действующие на данное тело со стороны других тел, называются **внешними** силами. Силы взаимодействия между частицами данного тела называются **внутренними** силами. ■

Применяя в своей деятельности различные приспособления (например, рычаг), древние люди обнаружили закономерность, впоследствии получившую название «золотое правило механики»: во сколько раз рычаг дает преимущество в силе, во столько же раз он дает проигрыш в расстоянии. ■

СТАТИКА

Статикой называется раздел механики, рассматривающий общесвойства сил и условия равновесия материальных тел, т.е. условия, при которых приложенные к телу силы не изменяют его движения.

Как уже упоминалось ранее, основателем статике считается древнегреческий мыслитель Архимед (287–212 гг. до н.э.). Это связано с тем, что именно он создал теорию рычага. Вот ее основные постулаты:

- Равные тяжести на равных длинах уравновешиваются, на неравных же длинах не уравновешиваются, но перевешивает тяжесть на большей длине.
- Если при равновесии тяжестей на каких-нибудь длинах к одной из тяжестей будет что-то прибавлено, то они не будут уравновешиваться, но перевесит та тяжесть, к которой было прибавлено.
- Точно так же, если от одной из тяжестей будет отнято что-нибудь, то они не будут уравновешиваться, но перевесит та тяжесть, от которой не было отнято.
- Если две величины уравновешиваются на каких-нибудь длинах, то на тех же самых длинах будут уравновешиваться и равные им.

Отталкиваясь от этих проверенных многовековым опытом положений, Архимед формулирует закон рычага в виде двух теорем. Первая из них гласит, что соизмеримые величины уравновешиваются на длинах, обратно пропорциональных тяжестим. Вторая — что если величины несоизмеримы, то они точно так же уравновесятся на рычагах, которые обратно пропорциональны этим величинам (рис. 5).

Одним из основных понятий статике является центр тяжести тела. Для того чтобы лучше понять природу этого понятия, необходимо вспомнить закон всемирного тяготения. Из него следует, что на все частицы тела, находящегося вблизи земной поверхности, действуют силы притяжения. Эти силы направлены вертикально вниз, к центру Земли. Но в связи с тем, что тело, по размерам сопоставимое с человеческим, по отношению к Земле можно считать материальной точкой, в статике принято считать силы тяжести всех отдельных частиц тела параллельными. Равнодействующая сил тяжести всех отдельных частиц тела называется **силой тяжести тела**, модуль этой силы называется **весом тела**. ■

Центром тяжести тела является неизменно связанная с телом точка, через которую проходит линия действия силы тяжести данного тела при любом положении тела в пространстве.

Кроме того, чтобы рассмотреть условия равновесия тел как основную задачу статике, необходимо определиться еще с одним понятием статике — моментом сил. Этот термин связан с силами, действующими на тела, закрепленные на какой-либо оси (например, дверь на петлях). ■

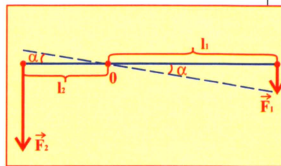


Рис. 5. Иллюстрация «золотого правила механики»: $F_1 l_1 = F_2 l_2$.

Моментом силы относительно какой-либо оси называется величина, характеризующая вращательный эффект данной силы относительно этой оси. При этом сила, действующая на тело, может вызвать его вращение только тогда, когда направление силы не проходит через ось вращения либо не параллельна с ней (в таком случае мы просто снимем дверь с петель). ■

Условие равновесия невращающихся тел: невращающееся тело находится в равновесии, если геометрическая сумма сил, приложенных к телу, равна нулю.

Условие равновесия тел, имеющих ось вращения (например, двери, колеса, качели и т.д.): тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех приложенных к телу сил относительно этой оси равна нулю.

Общее условие равновесия тела: тело находится в равновесии, если равны нулю геометрическая сумма векторов всех приложенных к нему сил и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно оси вращения.

В практической деятельности большое значение имеет качественная характеристика равновесия, называемая **устойчивостью**. Равновесие называют **устойчивым** (рис. 6, а), если при отклонении тела от положения равновесия действующие на него в этом случае силы такие, что под их действием тело возвращается к положению равновесия (типичный пример устойчивого равновесия наблюдается у всем знакомой детской игрушки «Ванька-встанька»). Если изменившиеся силы таковы, что вызывают дальнейшее отклонение тела от положения равновесия, и тело не будет оставаться вблизи положения равновесия, то такое равновесие называется **неустойчивым** (рис. 6, б). Именно поэтому, когда оставляют автомобиль на некоторое время, его рекомендуют ставить на ручной тормоз: если имеется хотя бы минимальный уклон дорожного полотна, владелец рискует никогда больше не увидеть своего железного коня. И наконец, если при отклонении тела от положения равновесия изменившиеся силы уравнивают одна другую при любом новом положении тела, то подобное равновесие называется **безразличным** (рис. 6, в). В качестве примера здесь можно привести футбольный мяч, находящийся на горизонтальной поверхности, — если мы его толкнем, то, прокатившись некоторое расстояние, он снова остановится.

Для того чтобы тело, имеющее неподвижную ось вращения (то же колесо), находилось в устойчивом равновесии, его центр тяжести должен располагаться ниже оси вращения и на вертикальной прямой, проходящей через эту ось. Если же центр тяжести находится выше оси вращения, то равновесие такого тела будет неустойчивым. В безразличном равновесии тело будет тогда, когда его центр тяжести будет совпадать с осью вращения (как это наблюдается у колеса).

Для того же чтобы определить равновесие тела, стоящего на опоре, необходимо провести вертикальную линию через центр тяжести этого тела и посмотреть, выходит эта линия за пределы опоры или нет. Если выходит, то тело опрокинется, если же нет — то равновесие данного тела устойчивое. Именно поэтому знаменитая Пизанская башня до сих пор не упала, а продолжает поражать воображение людей, не знакомых с законами статистики. ■

Положением равновесия называют такое положение тела, в котором все силы, действующие на него, взаимно уравниваются. ■

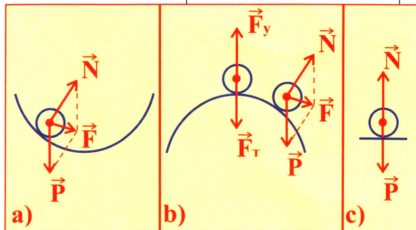


Рис. 6. Виды равновесия: а) устойчивое равновесие, б) неустойчивое равновесие, в) безразличное равновесие.

Пизанская башня продолжает упорно стоять несмотря на свой наклон, так как проекция ее центра тяжести не выходит за пределы ее основания, и поэтому башня находится в устойчивом равновесии.



Энергия может быть нескольких видов: механическая, электрическая, магнитная и ядерная. К механическим видам энергии относятся: энергия, связанная с поднятием тела над землей (и вообще энергия, связанная с силами всемирного тяготения), энергия, связанная с деформацией тела, и энергия, связанная с движением тела. ■

РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

Как мы уже знаем, на каждое тело постоянно действуют различные силы. Для того чтобы отразить степень этого воздействия, нам необходимо рассмотреть новую физическую величину. Если сила, действующая на тело, перемещает его на некоторое расстояние, то можно сказать, что эта сила совершает **работу**. Эта величина равна произведению модулей силы и перемещения, умноженному на косинус угла α между векторами силы $\vec{F}$ и перемещения $\vec{s}$: $A = Fs \cos \alpha$.

Как видно из формулы, работа является скалярной величиной и может иметь как положительное, так и отрицательное значение (в зависимости от знака косинуса угла α). Таким образом, если угол α между вектором силы и вектором перемещения меньше 90° , работа будет положительной (рис. 7, а). В случае, когда значения угла α находятся между 90° и 180° , работа носит отрицательный характер (рис. 7, б). Если же вектор силы перпендикулярен вектору перемещения, то работа силы равна нулю (рис. 7, с).

Если сила, приложенная к телу, совершает положительную работу, то скорость тела увеличивается, так как в этом случае сила, а значит, и ускорение, направлены по скорости, увеличивая ее. Если же сила совершает отрицательную работу, то ускорение направлено против скорости, и скорость тела убывает.

Например, если мы подбросим мяч вверх, то, пока он будет лететь вверх, сила тяжести будет совершать отрицательную работу, и скорость мяча уменьшится до нуля. Достигнув верхней точки, мяч начнет двигаться ускоренно вниз. Сила тяжести будет совершать при этом положительную работу.

Совершая работу, некоторые механизмы способны к своего рода «накоплению про запас» способности к совершению работы. Такими, например, являются пружинные механизмы. Заводя пружину, мы совершаем работу, в результате механизм получает способность выполнять работу в течение некоторого времени, после чего запас его работоспособности уменьшается. В данном случае происходит накопление работоспособности в результате деформации тела (пружины). Но это не единственный способ; накапливать способность к работе можно также путем подъема тела на определенную высоту (например, гиревой завод настенных часов) либо сообщив телу некоторую скорость (разогнав велосипед, некоторое время можно наслаждаться ничегонеделанием, так как он сам нас везет). Во всех этих случаях работа совершается в результате изменения состояния тела (велосипед рано или поздно остановится, если не вращать педали). Таким образом, мы сталкиваемся с новой физической величиной — энергией, отражающей запас работы, которую может совершить тело, изменяя свое состояние. ■

Как уже упоминалось, когда тело совершает работу благодаря тому, что оно движется, скорость его движения уменьшается. Если скорость тела уменьшится до нуля, то запас способности совершать работу за счет движения тела будет исчерпан. Таким образом, можно предположить, что любое движущееся тело обладает некоторым определенным запасом способности совершать работу, т.е. определенной энергией, обусловленной тем, что оно движется. Энергию, которой тело обладает потому, что

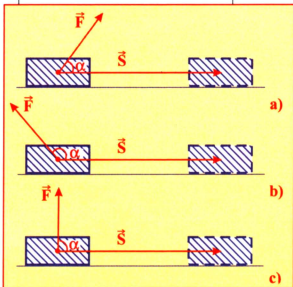


Рис. 7. В зависимости от знака косинуса угла α (между приложенной силой и направлением перемещения) работа может быть: а) положительной, б) отрицательной, с) равной нулю

Отношение работы A ко времени t , в течение которого она совершалась, является физической величиной и носит название **мощности**:

$$N = \frac{A}{t}.$$

Единица мощности называется ваттом (Вт). Один ватт равен мощности, при которой совершается работа 1 Дж за время 1 с:

$$1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

Работа, совершаемая за 1 ч при мощности в 1 кВт, называется киловатт-часом: $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$. ■

оно движется, называют кинетической энергией и находят ее значение по формуле:

$$E_k = \frac{mv^2}{2},$$

где m — масса тела, а v — его скорость.

Существует еще один вид механической энергии, и он связан с работой силы тяжести. Для того чтобы поднять тело на некоторую высоту h , необходимо совершить работу, равную mgh , т.е. поднятое тело обладает энергией, равной произведению силы тяжести, действующей на это тело, и высоты, на которую оно поднято. Эта энергия не зависит от того, по какому пути происходил подъем, а определяется лишь положением тела (высотой, на которую оно поднято) и называется **потенциальной энергией**:

$$E_p = mgh.$$

Тело, не взаимодействующее с другими телами, не может обладать потенциальной энергией. Потенциальная энергия — это энергия взаимодействия тел.

Кинетическая и потенциальная энергия тела находятся в тесной взаимосвязи между собой, которая выражается в так называемом законе сохранения энергии. ■

Закон сохранения энергии в механических процессах. Сумма кинетической и потенциальной энергии тел, составляющих замкнутую систему и взаимодействующих между собой силами тяготения и силами упругости, остается постоянной.

Таким образом, благодаря этому закону можно глубже понять суть работы — работа равна энергии, превратившейся из одного вида в другой. Необходимо отметить, что закон сохранения механической энергии не выполняется, если между телами действуют силы трения. В подобной ситуации вступает в действие другой, более общий закон — закон сохранения и превращения энергии. ■

Закон сохранения и превращения энергии. При любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает, а только превращается из одной формы в другую (рис. 8).

При совершении работы против сил трения она не переходит полностью в кинетическую или потенциальную энергию тел. Таким образом, суммарная механическая энергия тела уменьшается, переходя в другие виды внутренней энергии тела. В первую очередь происходит нагревание тела либо различных его частей. Например, при торможении происходит нагревание тормозных колодок автомобиля. ■

Кроме нагревания в теле могут происходить и другие изменения — оно может измельчаться, растрескаться в пыль, расплавляться (т.е. переходить из твердого состояния в жидкое, как это имеет место при плавлении куска льда в результате трения о другое тело). ■

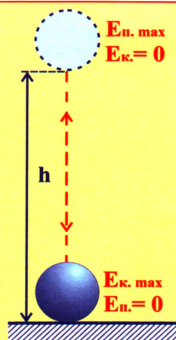
Вообще же, закон сохранения и превращения энергии отражает глубинную взаимосвязь всех форм энергии между собой. Эта связь будет все более ясно раскрываться перед нами по мере изучения физических законов. ■

Сумма кинетической и потенциальной энергии тел называется **полной механической энергией**.

Система тел, не взаимодействующих с другими телами, не входящими в эту систему, называется **замкнутой системой**. ■

Закон сохранения и превращения энергии используется человеком в устройствах, предназначенных для преобразования энергии из одного вида в другой, — в так называемых энергетических машинах. Примерами энергетических машин является паровая машина и двигатель внутреннего сгорания (преобразующие внутреннюю энергию топлива в механическую энергию), электродвигатель и электрический генератор (преобразующие электрическую энергию в механическую и наоборот) и т.д. ■

Рис. 8. В самой верхней точке траектории движения тела под действием силы тяжести его потенциальная энергия будет иметь максимальное значение, тогда как кинетическая энергия будет минимальна. При падении тела ситуация меняется — в нижней точке траектории максимальное значение будет иметь уже кинетическая энергия тела, в то время как потенциальная энергия будет минимальна.



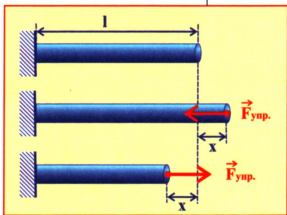
Твердым телом (абсолютно твердым телом) называется идеализированная система материальных точек, все расстояния между которыми остаются неизменными при движении этой системы как целого в пространстве и времени. ■

Под **деформацией** подразумевают изменение линейных размеров и объема твердых тел под действием пар противоположно направленных внешних сил. Деформации бывают **упругими** (они исчезают после окончания действия внешних сил) и **пластическими** (сохраняются в теле после прекращения действия внешних сил). ■

Твердое тело, которое может испытывать только упругие деформации, называют абсолютно упругим телом. ■

Деформируемое тело обладает запасом потенциальной энергии, которая называется упругой энергией, и может совершать работу. Упругая энергия равна работе сил, затраченной на деформацию тела, при условии, что его кинетическая энергия не изменяется. ■

Рис. 10. Направление вектора силы упругости противоположно направлению вектора перемещения при деформации (l — длина стержня, x — удлинение стержня).



МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Силы упругости

Как следует из закона всемирного тяготения, у поверхности Земли на всякое тело действует сила тяжести, направленная к ее центру. Но, как мы видим, большая часть окружающих нас предметов находится в покое — например, стул, на котором мы сидим. Это означает, что кроме силы тяжести на тело действуют другие силы и их равнодействующая равна нулю.

В случае с притяжением Земли основную работу по противодействию силе тяжести выполняет так называемая сила упругости (рис. 9). Силой упругости называется сила, возникающая в результате деформации тела и направленная в сторону, противоположную перемещению частиц тела при деформации.

В жизни каждый из нас сталкивается с проявлением сил упругости — например, во время прогулки по лесу приходится иногда уклоняться от веток деревьев, чтобы они не хлестали по лицу. В основе этой способности деревьев лежит именно сила упругости. Но мы также знаем, что если ветку согнуть до определенного предела, то она просто сломается, т.е., говоря научным языком, упругая деформация перейдет в пластическую. Эта величина носит название **предела упругости**.

Сила упругости подчиняется определенным законам. Одним из основных среди них является **закон Гука**, названный так в честь английского ученого Роберта Гука (1635—1703), первым экспериментально установившего связь между проекцией силы упругости и удлинением тела. ■

Закон Гука. Сила упругости, возникающая при деформации тела, пропорциональна удлинению тела и направлена в сторону, противоположную направлению перемещений частиц тела при деформации (рис. 10):

$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

где x — удлинение тела, а коэффициент пропорциональности k — жесткость тела, зависящая от формы и размеров тела и от материала, из которого оно изготовлено. ■

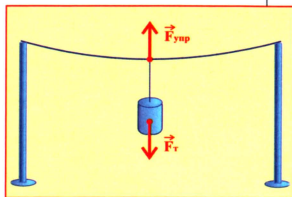


Рис. 9. Сила тяжести $\vec{F}_Г$, действующая на груз, уравновешена равной по модулю и противоположно направленной силой упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, возникающей при деформации планки, на которой груз подвешен.

Деформации также бывают однородными и неоднородными. Однородными деформациями называются такие деформации, при которых все бесконечно малые элементы тела деформированы одинаково. Неоднородными называют те деформации, которые изменяются при переходе от одной точки тела к другой.

Разновидностью однородной деформации является деформация сдвига, при которой все слои твердого тела, параллельные некоторой плоскости, называемой плоскостью сдвига, перемещаются в одном и том же направлении, параллельном плоскости сдвига. Сдвиг является очень распространенным видом деформации. Он имеет место во всех твердых трущихся телах (например, если тащат тело по полу, то и тело и пол находятся в состоянии сдвига).

Примером неоднородных деформаций является кручение и изгиб. Кручение является особой формой сдвига. При кручении под действием внешней силы происходит относительный поворот параллельных сечений тела вокруг некоторой оси. Угол, на который повернется радиус самого крайнего сечения, называется углом кручения. Кручение широко распространено в технике — так, например, карданный вал автомобиля, вращающий вал винта корабля и прочие подобные приспособления при работе испытывают деформацию кручения.

Изгиб имеет место тогда, когда одни части тела претерпевают сжатие, а другие — растяжение в параллельных направлениях, как, например, это происходит в луке. Но необходимо отметить, что изгиб — один из самых распространенных видов деформации. Изгиб испытывают железнодорожные рельсы, потолочные перекрытия и т.д.

Силы упругости по своей природе являются электромагнитными силами. Связано это с тем, что любое тело состоит из атомов и молекул, в состав которых входят частицы, обладающие электрическими зарядами. В твердом теле силы отталкивания одноименных зарядов и притяжения разноименных электрических зарядов уравновешивают друг друга. В результате деформации взаимное положение атомов и молекул изменяется, и электрические силы стремятся восстановить первоначальное положение, вследствие чего и возникает сила упругости. ■



При деформации большое значение имеют такие характеристики тела, как прочность и твердость.

Из двух материалов более твердым считается тот, который может оцарапать другой. Эта способность материалов широко применяется в технике: например, при изготовлении резцов и сверл.

Не существует таких тел, которые могли бы деформироваться беспредельно, — рано или поздно, но они разрушатся. Для каждого материала существует максимальная нагрузка на единицу площади сечения, по достижении которой тело уже не сможет выдерживать нагрузку, — это так называемая разрушающая нагрузка. Чем больше разрушающая нагрузка, тем прочнее материал.

Величина разрушающей нагрузки зависит от ряда факторов: от качества материала, способа его обработки, формы тела и вида воздействия. ■

При стрельбе из лука в нем возникает деформация изгиба.

Сухим называется трение между поверхностями двух твердых тел в отсутствие какой-либо прослойки между ними. **Вязким** — трение между твердым телом и жидкой (или газообразной) средой либо между слоями этой среды. ■

Силы ТРЕНИЯ

Как видно из предыдущей главы, имеются силы, возникающие благодаря взаимодействию между атомами и молекулами в твердом теле. Существует и взаимодействие между различными телами, соприкасающимися друг с другом. В результате возникают силы, носящие название **сил трения**.

Силы трения действуют вдоль поверхностей соприкасающихся тел и направлены в сторону, противоположную перемещению этих тел относительно друг друга. Трение бывает сухое и вязкое.

Существует три вида сил сухого трения: сила трения покоя, сила трения скольжения и сила трения качения. ■

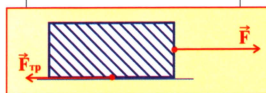


Рис. 11. Сила трения покоя возникает при отсутствии относительного движения тел.

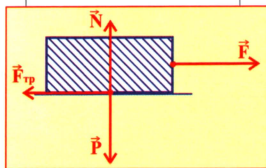
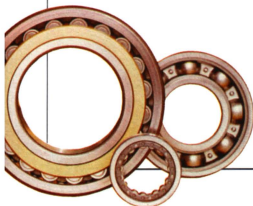


Рис. 12. Сила реакции опоры $\vec{N}$ равна по модулю и противоположна по направлению весу тела $\vec{P}$.

Благодаря подшипникам появилась возможность намного уменьшить силы трения.



Силой трения покоя называется сила, возникающая на границе соприкосновения тел при отсутствии относительного движения тел. Сила трения покоя $F_{тр}$ равна по модулю внешней силе $\vec{F}$, направленной по касательной к поверхности соприкосновения тел, и противоположна ей по направлению (рис. 11):

$$F_{тр} = -F.$$

В процессе взаимодействия тело и опора претерпевают определенную деформацию, в результате чего возникают силы упругости. Силу упругости $\vec{N}$, возникающую в результате деформации опоры и действующую на тело, принято называть **силой реакции опоры**. Максимальное значение модуля силы трения покоя пропорционально силе реакции опоры:

$$F_{тр, \max} = \mu N,$$

где μ — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения. ■

Силой трения скольжения называется сила, которая возникает между соприкасающимися и движущимися одно относительно другого телами. Вектор силы трения скольжения $\vec{F}_{тр}$ всегда направлен противоположно вектору скорости движения $\vec{v}$ тела относительно соприкасающегося с ним тела. Максимальное значение силы трения скольжения (так же, как и коэффициент трения) примерно равно силе трения покоя. ■

Силой трения качения называется сила, действующая со стороны опоры на катящееся по нему тело. Сила трения качения намного меньше силы трения покоя и силы трения скольжения, поэтому в технике для уменьшения сил трения применяются колеса, шариковые и роликовые подшипники. Коэффициент трения качения зависит от радиуса катящегося тела.

Силы **вязкого** трения зависят от скорости движения тела в среде:

$$\vec{F}_{тр} = -k\vec{v},$$

где $\vec{v}$ — скорость тела, k — коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров и формы твердого тела, состояния его поверхностей и от свойств среды. Если тело находится в состоянии покоя относительно среды, то силы вязкого трения равны нулю. ■

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Механика жидкости и газа — раздел механики, в котором изучают равновесие и движение жидких и газообразных сред, а также их взаимодействие между собой и с погруженными в них телами.

Отличительной особенностью жидкости является текучесть, которая обусловлена подвижностью молекул, ее составляющих. В результате этого поверхность покоящейся жидкости, находящейся в равновесии под действием силы тяжести, всегда горизонтальна.

Механические свойства жидкостей и газов во многом сходны и поэтому рассматриваются, как правило, вместе. ■

ГИДРОСТАТИКА

Одним из основных понятий механики жидкости и газа является **давление**, которое обозначает физическую величину, равную отношению модуля силы F , действующей со стороны жидкости (или газа) на какой-либо участок поверхности соприкасающегося с ним тела, к площади S этой поверхности:

$$p = \frac{F}{S}$$

Давление занимает важное место среди прочих физических величин, таких как масса, сила, скорость и т.д. Связано это с тем, что при изучении взаимодействия различных объектов часто необходимо знать не только действующие силы, но и площадь поверхности, на которую действует сила. В своей повседневной жизни мы постоянно сталкиваемся с давлением и используем его в своих целях. Особенно активно понятие «давление» применяется в технике. Сила тяжести вездехода на гусеничном ходу распределяется по всей площади гусеницы, уменьшая давление на грунт, что позволяет ему проезжать, не увязнув, даже через болото. Мы острее точим ножи, чтобы площадь лезвия была как можно меньше и при нарезке продуктов нам не приходилось прилагать большие усилия.

При воздействии внешних сил на твердые тела давление передается в направлении действия силы. Совершенно по-другому ведут себя жидкость и газ. Они передают производимое на них давление во все стороны одинаково. Это утверждение называют **законом Паскаля**, в честь его первооткрывателя, французского ученого Блеза Паскаля (1623–1662). ■



Блез Паскаль (1623–1662).

Жидкостью называют агрегатное состояние вещества, промежуточное между твердым и газообразным. Жидкость имеет следующие характеристики:

- сохраняет объем;
- образует поверхность;
- обладает прочностью на разрыв;
- принимает форму сосуда;
- обладает текучестью. ■

Рис. 13. Соотношение давлений.



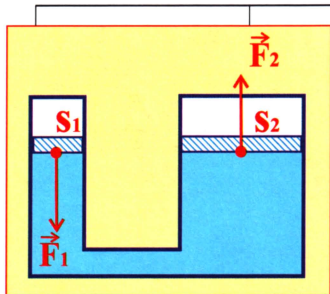


Рис. 14. Схематическое изображение гидравлической машины (пояснение смотри в тексте).

Когда Паскаль налил несколько кружек воды в трубку, бочку с водой, к неописуемому удивлению зрителей, просто разорвало.



Из закона Паскаля существует несколько следствий.

Первое следствие. Выигрыш в силе равен отношению площадей поршней: $\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}$,

где F_1 и F_2 — силы, действующие на поршни с площадями S_1 и S_2 .

На основе этого следствия работают гидравлические машины, представляющие собой два сообщающихся между собой цилиндра с поршнями, причем площади цилиндров существенно различаются. В результате того, что гидравлические машины дают выигрыш в силе во столько раз, во сколько площадь большего поршня больше площади меньшего поршня, их часто используют в качестве домкратов, в прессах для изготовления различных изделий, в тормозных системах и т.д. (рис. 14). ■

Второе следствие. Давление на дно сосуда, заполненного жидкостью, не зависит от формы сосуда и определяется уровнем жидкости:

$$p = \rho gh,$$

где ρ — плотность жидкости, g — модуль ускорения свободного падения, h — высота столба жидкости.

Давление, вызванное весом жидкости, часто называют **гидростатическим давлением**. Как мы видим из формулы, используя лишь небольшое количество воды, можно вызывать огромную силу давления, манипулируя с высотой столба жидкости. Об этом свидетельствует известный опыт Паскаля, когда он присоединил к бочке с водой длинную тонкую вертикальную трубку. Когда в эту трубку налили воду (всего несколько кружек), сила гидростатического давления разорвала бочку. ■

Третье следствие. Однородная жидкость в сообщающихся сосудах находится на одном и том же уровне. Если же в сосудах налиты жидкости с разными плотностями, то высота столба жидкости с меньшей плотностью будет больше высоты столба жидкости с большей плотностью:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1},$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотность жидкости, а h_1 и h_2 — высота столба жидкости. ■

Взаимосвязь давления жидкости и глубины вызывает возникновение выталкивающей силы, действующей на любое тело, погруженное в жидкость или газ. Эту силу называют архимедовой силой, в честь древнегреческого мыслителя Архимеда (287–212 гг. до н.э.), который первым описал и математически обосновал эту силу.

Для этого ему пришлось сформулировать предположение о внутренней структуре жидкости. Архимед предполагал, что жидкость состоит из частиц, расположенных на одинаковом уровне и прилежащих друг к другу. При этом менее сжатые частицы выталкиваются более сжатыми и каждая из частиц сдавливается жидкостью, находящейся над ней, если только жидкость не находится в каком-нибудь сосуде и не сдавливается еще чем-то другим. ■

Из этой гипотезы Архимед математически вывел ряд следствий:

- Тело, равновесное с жидкостью, будучи опущено в эту жидкость, погружается так, что никакая их часть не выступает над поверхностью жидкости и не будет двигаться вниз.
- Тело, более легкое, чем жидкость, будучи опущено в эту жидкость, не погружается целиком, и некоторая его часть остается над поверхностью жидкости.
- Тело, более легкое, чем жидкость, полностью опущенное в эту жидкость силой, будет выталкиваться вверх с силой, равной тому весу, на который жидкость, имеющая равный объем с телом, будет тяжелее этого тела.
- Тело, более тяжелое, чем жидкость, опущенное в эту жидкость, будет погружаться, пока не дойдет до самого низа, и в жидкости станет легче на величину веса жидкости в объеме, равном объему погруженного тела (поэтому, находясь в воде, нам кажется, что мы меньше весим). ■

В современном виде закон Архимеда звучит так: на всякое тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, направленная вверх и равная весу вытесненной им жидкости:

$$F_A = mg = \rho Vg,$$

где m — масса вытесненной жидкости, ρ — плотность жидкости (или газа), V — объем части тела, погруженного в жидкость или газ, g — ускорение свободного падения.

Тело, погруженное в жидкость (или газ), испытывает воздействие двух противоположно направленных сил — силы тяжести и архимедовой силы. Теперь можно по-другому сформулировать следствия закона Архимеда (см. выше):

- Если сила тяжести по модулю больше архимедовой силы, то тело опускается вниз — тонет.
- Если модуль силы тяжести равен модулю архимедовой силы, то тело может находиться в равновесии на любой глубине.
- Если архимедова сила по модулю больше силы тяжести, то тело поднимается вверх — всплывает.
- Всплывшее тело частично выступает над поверхностью жидкости, при этом объем погруженной части плавающего тела таков, что вес вытесненной жидкости равен весу плавающего тела.

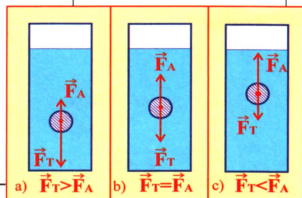
Архимедова сила тогда больше силы тяжести, когда плотность жидкости больше плотности погруженного в жидкость тела. Поэтому некоторые материалы не тонут в воде (например, дерево). Это свойство было давно замечено людьми, благодаря чему стало возможным мореплавание. Сперва были бревна (самое простое средство передвижения по воде), затем плоты, лодки и наконец современные океанские лайнеры, изготовленные из стали, плотность которой больше чем в 7 раз превышает плотность воды. Объясняется это просто — ведь из стали делают лишь корпус судна, а большая часть его объема заполнена воздухом. Среднее значение плотности корабля при этом оказывается значительно меньше плотности воды — поэтому он не только не тонет, но и может перевозить большое количество грузов (морской транспорт — один из самых выгодных).

Закон Архимеда позволяет измерять плотности тел, имеющих неправильную форму, объем которых трудно найти с помощью простых измерений их линейных размеров, а также определять плотность одной жидкости, если известна плотность другой. ■



Архимед (287–212 гг. до н.э.).

Рис. 15. Следствия закона Архимеда: а) сила тяжести по модулю больше архимедовой силы, поэтому тело тонет, б) силы равны, тело находится в равновесии, в) архимедова сила больше силы тяжести, тело всплывает



Газом называют агрегатное состояние, в котором все его частицы (атомы, молекулы) слабо взаимодействуют между собой и, двигаясь, заполняют весь предоставляемый ему объем. Основным свойством газа является его способность полностью заполнить сосуд, в котором он находится. ■

Как уже упоминалось, закон Архимеда применим и к телам, погруженным в газ. Используя его, можно покорять «пятый океан» — атмосферу. Первыми отважились на подобное мероприятие братья Монгольфье, создавшие в 1783 году воздушный шар, наполненный горячим воздухом. Позже в воздушных шарах стали использовать газ, с плотностью меньшей, чем у воздуха. Сначала это был водород, но после ряда катастроф (водород имеет обыкновение взрываться от малейшей искры) перешли на гелий. В наше время в воздушных шарах чаще всего используют нагретый воздух. ■

Знаменитый опыт Отто фон Герике с «магдебургскими полушариями».

АЭРОСТАТИКА

Для большинства из нас атмосфера — это нечто само собой разумеющееся, на что мы не обращаем внимания. А если обратим, то будем поражены тем, сколько мы носим на себе дополнительного веса — веса, казалось бы, «невесомого» воздуха. Под действием силы тяжести верхние слои воздуха в атмосфере давят на нижележащие, поэтому у поверхности Земли давление имеет наибольшее значение, которое составляет 10^5 Па. Такое давление называют **атмосферным**. Оно уменьшается по мере удаления от поверхности Земли: при подъеме на каждые 8 м давление падает на 100 Па.

Но мы не ощущаем атмосферного давления из-за того, что жидкости, содержащиеся в организме человека (кровь, лимфа, желчь и пр.), сжаты до такого же давления. По этой причине человека, попавшего в безвоздушную среду, просто разорвет на части силами внутреннего давления (этот научный факт любят использовать в своих фильмах голливудские режиссеры — например, фильм Пола Верховена «Вспомнить все» с Арнольдом Шварценеггером в главной роли).

Наличие атмосферного давления впервые было показано и измерено в 1643 году итальянским физиком Евангелистой Торричелли (1608–1647). В своем фундаментальном опыте он наполнил ртутью стеклянную трубку длиной около одного метра, запаянную с одного конца, и открытым концом поместил в сосуд с ртутью. При этом часть ртути вылилась из трубки и установилась на уровне, при котором столбик ртути в трубке оказался выше уровня ртути в сосуде. Высота этого столбика ртути — 760 мм — определяет атмосферное давление в миллиметрах ртутного столба. Мы можем наполнить стеклянную трубку другой жидкостью, тогда высота установившегося уровня этой жидкости в трубке после помещения ее в сосуд, заполненный такой же жидкостью, будет иной. Например, высота уровня воды, равная 10332 мм, и будет определять нормальное атмосферное давление в миллиметрах водного столба. Это означает, что воздух давит на нас с силой, равной силе давления десятиметрового столба воды. Торричелли первым установил, что атмосферное давление $P = 760$ мм рт. ст. = 10332 мм водного столба $\approx 10^5$ Па. Прибор, служащий для измерения атмосферного давления, называется **барометром**.

Спустя 11 лет выдающимся немецким физиком-экспериментатором Отто фон Герике с целью доказательства существования давления воздуха был проведен знаменитый опыт с так называемыми «магдебургскими полушариями». Заклучался он в том, что из двух сложенных вместе медных полушарий откачался весь воздух. В результате давление наружного воздуха так сильно прижало полушария друг к другу, что их не смогли разорвать две упряжки по 8 лошадей. ■



Гидродинамика и аэродинамика

Гидродинамика и аэродинамика изучают движение жидкости и газов, причем не отдельной молекулы жидкости, а целого элемента объема, содержащего много молекул, но рассматриваемого как частица жидкости или точка.

Один из основных принципов движения жидкости (и газа) был высказан в 1726 году швейцарским физиком Даниилом Бернулли (1700–1782): в струе воды или воздуха давление велико, если скорость мала, и давление мало, если скорость велика.

Закон Бернулли также применим для жидкости и газа, не ограниченных стенками трубы (например, это бывает в морских течениях). Дело в том, что в жидкости существуют **линии тока**, вдоль которых происходит движение жидкости. Они разбивают жидкость на отдельные струи, которые текут рядом, не смешиваясь. В подобных случаях **закон Бернулли** звучит так: в тех местах потока, где линии тока сближены, давление понижено, а в тех местах, где они расходятся, давление повышено.

При движении слоев жидкости с различными скоростями между ними возникают силы, называемые **силами внутреннего трения** или **силами вязкости** (о них мы также упоминали в главе, посвященной силам трения):

$$F_{\text{тр}} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta d} S,$$

где Δv — относительная скорость слоев жидкости, Δd — расстояние между ними, S — площадь соприкосновения слоев. Коэффициент η называется **коэффициентом внутреннего трения** или **динамической вязкостью**. Динамическая вязкость жидкостей с повышением температуры уменьшается, а динамическая вязкость газов — увеличивается.

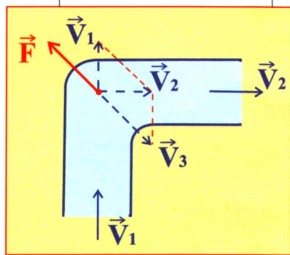
Если вы когда-нибудь поливали землю водой из садового шланга, то знаете, что для его удержания необходимо прилагать усилия — тем больше, чем сильнее напор воды. Связано это с тем, что при течении по изогнутой трубке (каковой и является шланг) вектор скорости изменяется. Как видно из рисунка 16, к первоначальной скорости $\vec{V}_1$ добавляется $\vec{V}_3$, и получается результирующая скорость $\vec{V}_2$. Изменение скорости течения, представленное вектором $\vec{V}_3$, показывает, что при течении по изогнутой трубке жидкости сообщается ускорение, направленное вдоль этого вектора, и, следовательно, по третьему закону Ньютона, на трубку со стороны жидкости действует сила противодействия $\vec{F}$, направленная противоположно. В гидро- и аэродинамике эта сила называется **реакцией струи**. ■

Явление реакции струи наблюдается во всех случаях, когда струя жидкости или газа изменяет свое направление, встречая на пути твердые тела. Это явление широко применяется в технике (например, в различных типах турбин, в ветродвигателях). На принципе реакции

Принято отличать ламинарное (слоистое) и турбулентное течение жидкости. При **ламинарном** течении частицы жидкости движутся вдоль прямолинейных траекторий, не перемешиваясь. При этом жидкость может быть представлена в виде слоев, которые скользят один относительно другого.

При **турбулентном** течении скорость и давление жидкости (или газа) быстро и нерегулярно изменяются со временем. Кроме того, нерегулярным образом меняются плотность и температура, и происходит интенсивное перемешивание жидкости (газа). ■

Рис. 16. Схема возникновения силы реакции струи (пояснение в тексте).



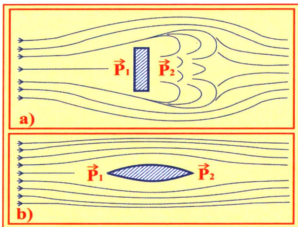


Рис. 17. Если в поток воздуха поместить пластинку (а), то позади нее образуется область вихревого движения воздуха, и разность давлений $\vec{P}_1$ и $\vec{P}_2$ будет велика; если же тело имеет обтекаемую форму (б), то эта разница будет незначительна.

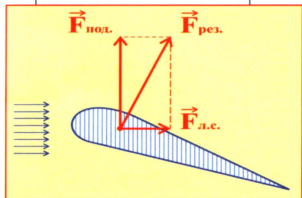
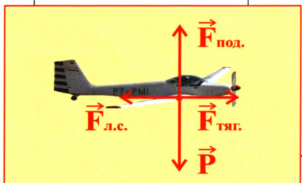


Рис. 18. Результирующую силу $\vec{F}_{рез.}$ можно разложить на составляющие ее силы — подъемную силу $\vec{F}_{пол.}$ и лобовое сопротивление $\vec{F}_{л.с.}$.

Рис. 19. При горизонтальном равномерном полете на самолет действуют две пары сил, равных по модулю и противоположно направленных: подъемная сила $\vec{F}_{пол.}$ и вес самолета $\vec{P}$; сила тяги пропеллера $\vec{F}_{тяги.}$ и сила лобового сопротивления $\vec{F}_{л.с.}$.



струи основан и реактивный двигатель, позволивший человечеству вырваться в космос. Ракета весь запас отбрасываемого вещества (топлива) несет с собой, и поэтому для движения ей не нужны ни земля, ни вода, ни воздух.

Скорость ракеты можно определить, воспользовавшись законом сохранения импульса:

$$\vec{V} = \frac{m}{M} \vec{v},$$

где M — масса ракеты, $\vec{V}$ — скорость ракеты, m — масса выброшенных газов, $\vec{v}$ — скорость истечения газов.

Ракеты имеют обтекаемую форму (так же, как и любой аппарат, предназначенный для движения с высокими скоростями, — самолет, гоночный болид, пуля и т.д.). Связано это с тем, что при движении с большой скоростью становится заметной сила сопротивления воздуха (либо воды). С одной стороны, она вызывается трением воздуха о поверхность тела. С другой — изменением движения потока, вызванным телом, в результате чего давление на передней стороне тела растет, а на задней — падает. Возникает разность давления, приводящая к торможению движущегося тела (рис. 17).

Если тело имеет несимметричную форму или расположено под углом к направлению потока, то действующая на тело сила также будет направлена под углом к потоку. Эту силу можно разложить на составные: вертикальную, называемую **подъемной силой**, и горизонтальную, называемую **силой лобового сопротивления** (рис. 18). Благодаря существованию подъемной силы человек смог построить летательные аппараты тяжелее воздуха (рис. 19). Теория возникновения подъемной силы крыла при обтекании потоком воздуха была разработана русским ученым Н.Е. Жуковским (1847–1921), которого считают «отцом» авиации.

Подъемная сила связана с площадью крыла и скоростью летательного аппарата. Чем меньше скорость, развиваемая аппаратом, тем больше должна быть площадь крыла — поэтому тихоходные самолеты (типа «кукурузника») имеют большую площадь крыла, а сверхзвуковые истребители — маленькую. Кроме того, на форму крыла влияет и то, к полетам на какой высоте предназначен данный самолет — чем больше высота полета, тем меньше будет крыло. Связано это с тем, что с увеличением высоты воздух становится все более разреженным, и крылу не на что опираться — полет происходит уже не за счет подъемной силы, а за счет реактивного движения, как у ракеты. ■

Благодаря открытию реактивного движения сбылось одно из самых заветных желаний человечества — выйти за пределы Земли, в космос. Это произошло благодаря упорству, таланту и мужеству многих людей, но все-таки о нескольких из них стоит сказать особо.

Основоположником теории космических полетов считается русский ученый и изобретатель Константин Эдуардович Циолковский (1857–1935). Он научно обосновал возможность использования ракеты для полетов в космическое пространство, за пределы земной атмосферы и к другим планетам Солнечной сис-



темы. В его труде «Исследование мировых пространств реактивными приборами», опубликованном в 1903 году, была выведена формула, устанавливающая связь между скоростью ракеты, скоростью истечения газов, массой ракеты и массой горючего. Циолковский теоретически обосновал возможность создания ракеты, способной разогнаться до скорости 8 км/с и улечь в космическое пространство. В качестве горючего для такой ракеты он предлагал использовать жидкий водород, а в качестве окислителя — жидкий кислород. ■

Идеи Циолковского были развиты Фридрихом Артуровичем Цандером (1887–1933). Основные оригинальные идеи, высказанные и обоснованные им, — это создание двигателя внутреннего сгорания на бензине и жидком кислороде, то есть такого двигателя, который может работать в безвоздушной среде; использование в качестве топлива отработанных частей ракеты; планирующий спуск космического корабля при возвращении на Землю (теперь это называется аэродинамическим спуском и применяется в космических аппаратах типа «Шаттл» или «Буран»); тепловая защита корабля при движении в атмосфере; запуск ракеты с промежуточной станции — большого аэроплана или спутника и многое другое. Цандер ставил опыты по сжиганию различных металлов, проверяя их способность стать топливом для ракетного двигателя, и проводил множество других интересных и неожиданных экспериментов.

Еще одним из основоположников космонавтики был гениальный украинский советский инженер Юрий Васильевич Кондратюк. Именно он разработал идею создания «космических ракетных поездов», которая впоследствии была осуществлена выдающимся русским советским ученым — академиком Сергеем Павловичем Королевым (1907–1966). ■

Кондратюк доказывал: межпланетная ракета обязательно должна состоять из нескольких ракет, ступеней, сцепленных друг с другом, как вагоны поезда. Отработала первая ступень, опустели ее топливные баки — и она отпадает. «Космический поезд» становится легче, скорость его увеличивается. Отработала вторая ступень, и она тоже отделяется. Быстрота полета возрастает еще больше. Наконец,

Современные космические аппараты «Шаттл» и «Буран» при возвращении на Землю используют планирующий спуск, возможность которого была обоснована Ф.А. Цандером.

При осуществлении космических полетов огромное значение имеет так называемая первая космическая скорость. При некотором значении начальной скорости тело, брошенное по касательной к поверхности Земли, под действием силы тяжести при отсутствии атмосферы может двигаться вокруг Земли по окружности, не падая на Землю и не удаляясь от нее. Скорость, с которой происходит движение тела по круговой орбите под действием силы всемирного тяготения, называется **первой космической скоростью**.

Для Земли первая космическая скорость равна:

$$v = \sqrt{Rg},$$

где R — расстояние от центра Земли, g — ускорение свободного падения. Первая космическая скорость для Земли $v \approx 7,9$ км/с.

Первая космическая скорость для любого небесного тела равна:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}},$$

где R — расстояние от центра небесного тела массой M до тела, движущегося под действием силы тяжести, G — гравитационная постоянная.

Если космическому аппарату сообщается скорость меньше первой космической, то он движется по траектории, которая пересекается с поверхностью земного шара, т.е. аппарат падает на Землю. ■



Фридрих Артурович Цандер (1887–1933).



Юрий Васильевич Кондратюк
(1897—1942).

При начальной скорости больше 7,9 км/с, но меньше 11,2 км/с космический аппарат движется вокруг Земли по криволинейной траектории — эллипсу. При достижении некоторого значения скорости, называемого **второй космической скоростью**, эллипс превращается в параболу и космический аппарат преодолевает силу тяготения Земли. При скорости больше второй космической космический аппарат будет двигаться по гиперболической траектории. ■

последний «вагон» достигает космической скорости, выходит на орбиту. Если ракета не будет состоять из таких ракет-ступеней, в космос она подняться не сможет.

Кондратюк подробно описал и наиболее выгодную траекторию взлета космического аппарата. Оказалось, что совсем не безразлично, как подниматься ракете: все время прямо вверх или наклонно, по дуге. Кондратюк доказал, что самое выгодное — соединить оба способа вместе. Некоторое время ракета должна идти прямо вверх, чтобы как можно скорее преодолеть плотные слои воздуха, а дальше — сворачивать в сторону и выходить на орбиту по дуге.

Самым важным открытием Юрия Васильевича Кондратюка стали промежуточные межпланетные базы. Опускать на планету весь корабль, по его мнению, не имело смысла, ведь для того, чтобы совершить плавную посадку, надо огромную скорость корабля снизить почти до нуля. Позже, при взлете с планеты, скорость придется набирать снова и тратить много топлива. По мнению Кондратюка, садиться должен лишь специальный аппарат с космонавтами, а главный корабль (корабль-матка) — оставаться на орбите. Более того, он предлагал создать вблизи Луны постоянную орбитальную базу, большой лунный спутник.

Правота Кондратюка была подтверждена в 1969 году, когда американские астронавты высадились на Луне, используя схему посадки, разработанную Юрием Васильевичем.

Благодаря усилиям этих и многих других ученых 4 октября 1957 году в Советском Союзе с помощью ракеты был запущен первый искусственный спутник Земли.

А 12 апреля 1961 года на космическом корабле «Восток» совершил первый в мире полет в космическом пространстве Юрий Алексеевич Гагарин (1934—1968). ■

Полеты космических кораблей с космонавтами на борту, автоматических межпланетных станций и искусственных спутников Земли используются для научных исследований в околоземном и межпланетном пространстве — с помощью спутников и автоматических межпланетных станций изучаются состав и строение атмосферы не только нашей планеты, но и Венеры и Марса, получены уникальные изображения поверхности Луны, Венеры и Марса и других планет Солнечной системы. Космические полеты используются и для решения огромного количества разнообразных практических задач различных отраслей науки. ■



Трудно сказать, знали ли американские астронавты, что схема их высадки на Луну была разработана советским инженером Кондратюком еще в 30-е годы?

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Молекулярная Физика

Молекулярная физика — это наука о строении, физических свойствах и агрегатных состояниях вещества, рассматриваемого как совокупность большого количества молекул, которые взаимодействуют между собой и находятся в тепловом движении. ■

Как уже упоминалось, предположения о том, что любое вещество состоит из бесчисленных неделимых частиц (отличающихся друг от друга величиной и формой) — атомов, высказывалось около 2500 лет назад древнегреческими философами Левкиппом и Демокритом. По их представлениям все тела образуются в результате соединения атомов. Различия в свойствах тел объясняются тем, что тела состоят из различных атомов или одинаковые атомы по-разному соединены между собой в пространстве. Эти ученые также признавали существование принципов сохранения материи (ничто не может возникнуть из ничего) и сохранения форм материи (природа все разлагает на тела и в ничто ничего не переводит, т.е. в природе повторяются постоянно одни и те же формы материи). ■

Большой вклад в формирование молекулярно-кинетических представлений о природе вещества сделал в середине XVIII в. великий русский ученый Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1766). Он объяснил основные свойства газа, предположив, что все молекулы газа движутся беспорядочно, хаотично и при столкновениях отталкиваются друг от друга. Беспорядочным движением молекул М.В. Ломоносов впервые объяснил природу теплоты. Из-за того, что скорости теплового движения молекул могут быть сколь угодно велики, температура вещества, по его представлениям, не имеет ограничения сверху. При уменьшении скорости молекул до нуля должно быть достигнуто минимально возможное значение температуры вещества. Эти его предположения полностью подтвердились в конце XIX века. ■

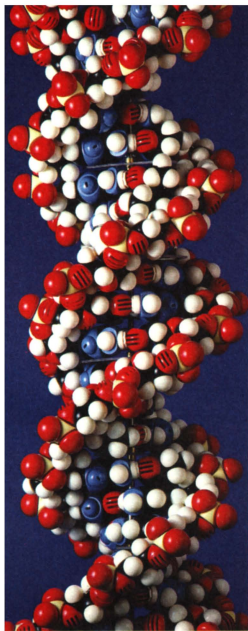
У некоторых элементов (например, инертных газов) молекулы состоят из отдельных атомов, у других (водород, кислород и пр.) — из нескольких атомов. У веществ, состоящих из нескольких элементов (например, вода), молекулы состоят из различных атомов элементов, входящих в их состав. ■

Молекулы — наименьшие частицы вещества, сохраняющие все его химические свойства. ■

Основными задачами молекулярной физики являются: 1) исследование строения вещества и его изменения под влиянием внешних воздействий; 2) изучение явлений переноса — диффузии, теплопроводности, внутреннего трения; 3) изучение фазовых превращений — испарения и конденсации, плавления и кристаллизации; 4) исследование критических состояний вещества; 5) исследование поверхностных явлений на границах раздела фаз. ■

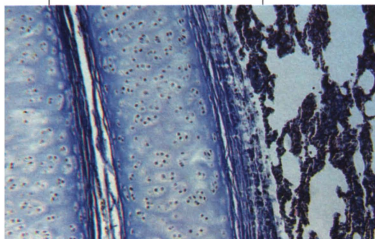


*Михаил Васильевич Ломоносов
(1711–1766).*



Молекула ДНК является примером сложной молекулы.

Электронный микроскоп позволил заглянуть в самые глубины микромира.



Положения МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В наши дни подобные представления обрели более конкретные очертания в виде молекулярно-кинетической теории строения вещества (в дальнейшем — МКТ).

Молекулярно-кинетической теорией называется учение о строении и свойствах вещества, использующее представления о существовании атомов и молекул как наименьших частиц химического вещества. ■

Основные положения МКТ состоят в следующем:

- все тела состоят из огромного числа мельчайших частиц (молекул, атомов или ионов);
- эти частицы непрерывно и хаотически движутся;
- частицы взаимодействуют друг с другом, причем силы взаимодействия в зависимости от расстояния между частицами будут силами притяжения или отталкивания. ■

Положение первое: все тела состоят из огромного числа мельчайших частиц.

Как уже упоминалось, подобное предположение было сделано 2500 лет назад на основе косвенных наблюдений — ведь увидеть невооруженным глазом молекулу или атом мы не в состоянии. Впервые человек смог увидеть молекулы при помощи электронного микроскопа, позволяющего исследовать элементы микромира (от греческого «микрос» — «малый»).

При проведении физических (и химических) исследований возникла необходимость в определении количества молекул в некотором количестве вещества. С этой целью была введена величина количества вещества, содержащего число граммов, равное его молекулярному весу, названная **молем**.

В настоящее время принято считать, что моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же частиц, сколько содержится атомов в 12 граммах углерода ^{12}C . Число молекул в одном моле вещества получило название **числа Авогадро** и определяется по формуле:

$$N_A = \frac{N}{\nu},$$

где N — число молекул вещества, ν — количество вещества. Постоянная Авогадро равна $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$. Масса моля называется **молярной массой** M , она равна отношению массы вещества m к количеству вещества ν :

$$M = \frac{m}{\nu}.$$

Молярная масса выражается в **килограммах на моль** (кг/моль).

Молярная масса и число Авогадро необходимы для определения массы молекулы вещества:

$$m_0 = \frac{M}{N_A} \cdot \blacksquare$$

Положение второе: частицы непрерывно и хаотически движутся. Мы постоянно имеем возможность наблюдать косвенные проявления движения молекул и атомов. Если насыпать сахар в воду, то спустя некоторое время обнаружится, что она приобрела более сладкий вкус, т.е. определенное количество сахара растворилось. Можно ускорить этот процесс, размешивая воду либо нагревая ее. При растворении сахара происходит его более равномерное распространение в воде. В физике явление смешивания нескольких веществ называется **диффузией**. При диффузии вещество распространяется во все стороны, в том числе и вверх, против силы тяжести. Явление диффузии свидетельствует о том, что молекулы вещества совершают движение. Это движение молекул существует не только в жидкостях и газах, но и в твердых телах и носит название **молекулярного теплового движения**. Характер движения молекул зависит от агрегатного состояния вещества.

Молекулы и атомы в твердом теле не могут удаляться на большое расстояние от положения равновесия, так как этому препятствуют большие силы притяжения и отталкивания. В результате этого они совершают беспорядочные колебательные движения в пределах положения равновесия.

В жидкостях движение молекул более сложное. Они совершают колебательное движение относительно положений равновесия, а также совершают перескоки из одного равновесного положения в соседнее, что является причиной текучести жидкостей.

В газах из-за больших расстояний между молекулами силы взаимодействия не заметны. В промежутках между взаимными столкновениями и столкновениями с другими препятствиями (например, стенками сосуда) молекулы движутся прямолинейно. Вследствие очень слабых сил взаимодействия между молекулами газы обладают способностью легко сжиматься и неограниченно расширяться.

Практическим доказательством существования молекулярного теплового движения стало открытие английским ботаником Робертом Броуном (1773–1858) в 1827 году беспорядочного движения видимых в микроскоп твердых частиц, находящихся в жидкости. Впоследствии это движение получило название **броуновского движения**. Причиной броуновского движения являются беспорядочные удары (толчки) со всех сторон молекул вещества о другие молекулы и препятствия. При этом считается, что движение отдельных молекул подчиняется законам механики Ньютона.

Уже упоминалось о том, что интенсивность движения молекул вещества связана со степенью его нагретости, которую характеризует физическая величина, называемая **температурой**. Мерой температуры является сред-

Под агрегатным состоянием вещества подразумевается его состояние, которое может быть твердым, жидким, газообразным. В газообразном состоянии вещество заполняет любой предоставленный ему объем и называется **газом**. В жидком состоянии вещество принимает форму сосуда, в который оно помещено, и называется **жидкостью**. В твердом состоянии вещество сохраняет любую форму и объем (без воздействия внешних сил) и называется **твердым телом**. Существует возможность перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое. ■

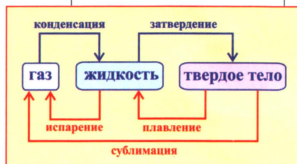


Рис. 20. Схема перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое.

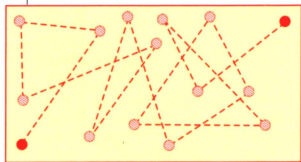


Рис. 21. Траектория движения броуновской частицы.

Для измерения температуры служат приборы, которые называются термометрами. В большинстве из них используется способность вещества (как правило, в жидком состоянии) расширяться под действием нагревания. Недостатком подобных термометров является то, что ими можно пользоваться только при таких температурах, при которых вещество, которым они наполнены, остается в жидком состоянии. Например, измерять ртутным термометром температуру ниже -39°C нельзя, т.к. ртуть при более низкой температуре затвердевает. Поэтому в районах с более низкой температурой (например, в Антарктиде) часто используют спиртовые термометры. ■

няя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

Из жизненного опыта все знают, что при прикосновении более горячее тело будет нагревать более холодное, т.е., по сути, происходит передача части кинетической энергии движения молекул от одного тела к другому. Спустя некоторое время после установления контакта между телами их температура уравнивается. Такое состояние, когда отсутствует теплообмен, называется **тепловым равновесием**.

Существует температура, при которой в веществе полностью отсутствует молекулярное тепловое движение. Эта температура называется **абсолютным нулем** T_0 и равна $-273,15^{\circ}\text{C}$.

1°C — градус Цельсия равен $1/100$ разницы температур плавления льда и кипения воды. Никакое вещество нельзя охладить до температуры ниже абсолютного нуля. Существует температурная шкала, которая за точку отсчета принимает температуру абсолютного нуля. Эта шкала носит название **абсолютной шкалы**, и единицей измерения в ней является **кельвин (К)**, названный так в честь английского физика Уильяма Кельвина (Томсона), предложившего эту шкалу к использованию. ■

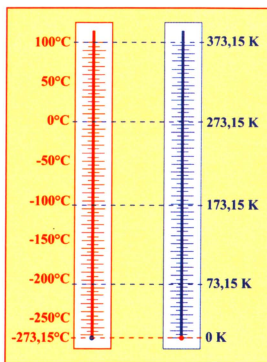


Рис. 22. Сравнение температурных шкал Цельсия и Кельвина.

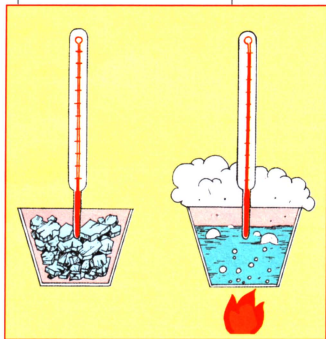


Рис. 23. Точками отсчета при создании шкалы Цельсия явились значения температур плавления льда и кипения воды.

Положение третье: частицы взаимодействуют друг с другом.

Можно часто наблюдать, как после дождя на листьях, на траве, на карнизах домов повисают капли, и иногда проходит достаточно времени, прежде чем они упадут. В данном случае видно проявление сил молекулярного притяжения, удерживающих каплю на весу. С другой стороны, для того, чтобы сжать жидкость, необходимо приложить колоссальное усилие. Нашим попыткам будут препятствовать силы молекулярного отталкивания. При уменьшении расстояния между молекулами силы отталкивания становятся больше сил притяжения, и наоборот. Необходимо отметить, что это правило верно для жидкостей и твердых тел, тогда как для газов, в силу большого расстояния между молекулами, оно неприменимо.

Силы взаимодействия молекул по своей природе являются электрическими силами, действующими между заряженными частицами (электронами, ядрами), входящими в состав атомов, из которых состоят молекулы. Более подробно о природе электрических сил будет рассказано в разделе, посвященном электричеству. ■

СВОЙСТВА ГАЗОВ

Для объяснения свойств вещества в газообразном состоянии используется так называемая модель идеального газа. Она предполагает следующее: молекулы обладают пренебрежимо малым объемом по сравнению с объемом сосуда, между молекулами не действуют силы притяжения, при соударениях молекул друг с другом и со стенками сосуда действуют силы отталкивания.

Вначале рассмотрим такой параметр как давление газа. Как мы уже знаем, давление равно отношению модуля силы давления к площади, на которую оказывается давление (в нашем случае, площадь стенки сосуда). Исходя из основных положений МКТ можно вывести следующую формулу:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2,$$

где m_0 — масса молекулы, $\bar{v}$ — среднее значение скорости молекул, n — концентрация молекул. Эта формула называется **основным уравнением молекулярно-кинетической теории**.

Связав это уравнение с уравнением кинетической энергии движения молекул, получаем: **давление идеального газа равно двум третям средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема:**

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon},$$

где $\bar{\epsilon}$ — среднее значение кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа. ■

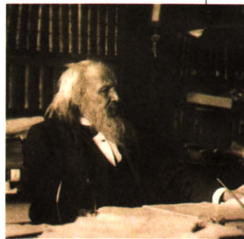
Давление газа зависит от степени его сжатия, т.е. от количества молекул газа в определенном объеме (например, надувая воздушный шар, мы заставляем воздух все сильнее давить на поверхность шара). Также давление газа зависит от его температуры. Как правило, изменение давления связано с обеими причинами одновременно. Уравнение состояния идеального газа, устанавливающее связь между давлением, объемом и температурой газов, впервые было получено французским физиком Бенуа Клапейроном (1799–1864). Впервые его применил великий русский ученый Дмитрий Иванович Менделеев (1834–1907), поэтому уравнение состояния газа называется уравнением Менделеева — Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

где p — давление газа, V — объем сосуда, m — масса вещества, M — молярная масса вещества, R — молярная газовая постоянная, T — температура вещества.

Практический интерес представляют процессы, в которых давление зависит только от одного параметра (объема либо температуры), при неизменности другого. Исследования зависимости давления газа от его температу-

Давление газа является результатом соударения большого числа молекул газа о стенки сосуда, в котором он находится. В момент соударения молекула действует на стенку сосуда с определенной силой и отражается от нее под действием силы, действующей на молекулу со стороны стенки. При большом числе соударений сила действия молекулы на стенку практически постоянна. Отношение усредненной во времени силы действия молекулы на стенку к единице площади поверхности этой стенки и определяет давление газа. ■



Дмитрий Иванович Менделеев
(1834–1907).

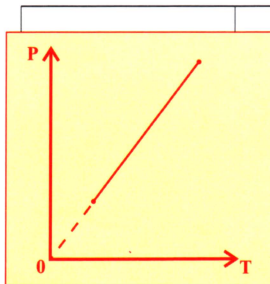


Рис. 24. График изохорного процесса.

Для того чтобы лучше понять процессы нагревания газа при сжатии и охлаждения при расширении, необходимо рассмотреть поведение молекул газа во время этих процессов. Когда газ имеет постоянный объем и температуру, то молекула, ударяясь и отскакивая от стенок сосуда, сохраняет неизменными свою скорость и кинетическую энергию.

Когда происходит сжатие газа, то молекула ударяется и отскакивает от приближающегося к ней поршня. В результате чего ее скорость и кинетическая энергия возрастают, так как надвигающийся поршень сообщает молекуле дополнительную энергию и скорость (попросту говоря, происходит сложение скоростей). При расширении поршень удаляется от молекулы, в результате чего скорость молекулы уменьшается, так как молекула совершает работу, толкая отходящий поршень. Таким образом, расширение газа сопровождается совершением работы и приводит, в полном соответствии с законом сохранения энергии, к уменьшению внутренней энергии газа, проявляющемуся в падении его температуры. ■

ры при неизменном объеме (так называемый **изохорный процесс**) впервые были осуществлены в 1787 году французским физиком Жаком Шарлем (1746–1823). Он установил, что, во-первых, приращение давления пропорционально приращению температуры. Во-вторых, величина, показывающая, на какую часть давления при 0°C увеличивается давление газа при нагревании на 1° , имеет одно и то же значение для всех газов. ■

Закон Шарля. Давление некоторой массы газа при нагревании на 1° в неизменном объеме увеличивается на часть $\frac{1}{273}$ давления при 0°C :

$$p = p_0 \alpha T,$$

где p — давление газа при абсолютной температуре T , p_0 — давление газа при температуре 0°C , α — температурный коэффициент давления газа, равный $\frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$. ■

Связь между давлением и объемом газа при постоянной температуре (**изотермический процесс**) была установлена экспериментально до создания МКТ газов в 1662 году английским физиком Робертом Бойлем (1627–1691) и в 1676 году — французским физиком Эдмом Мариоттом (1620–1684). Поэтому это уравнение называют **законом Бойля — Мариотта**. ■

Закон Бойля — Мариотта. Давление некоторой массы газа при неизменной температуре обратно пропорционально объему газа:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1},$$

где V_1 и V_2 — начальный и конечный объем газа, p_1 и p_2 — начальное и конечное давление.

Также большой интерес представляет собой зависимость объема газа от температуры при постоянном давлении (**изобарный процесс**). Экспериментальное исследование этой зависимости было проведено в 1802 году французским физиком Жозефом Гей-Люссаком (1778–1850). ■

Закон Гей-Люссака.

При нагревании на 1° при постоянном давлении объем некоторой массы газа увеличивается на $\frac{1}{273}$ того объема, который эта масса газа занимала при:

$$V = V_0 \alpha T,$$

где V — объем газа при абсолютной температуре T , V_0 — объем газа при температуре 0°C , коэффициент α называется температурным коэффициентом объемного расширения.

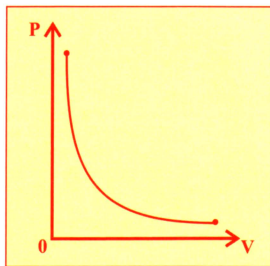


Рис. 25. График изотермического процесса.

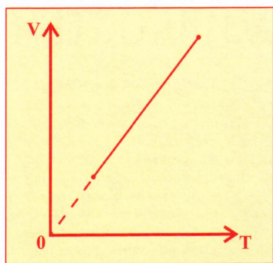


Рис. 26. График изобарного процесса.

$$\Delta U = A.$$

Так как работа внешних сил при сжатии положительна, то внутренняя энергия газа при адиабатном сжатии увеличивается и, следовательно, его температура повышается.

При адиабатном расширении газ совершает работу A' за счет уменьшения своей внутренней энергии:

$$\Delta U = -A',$$

поэтому температура газа при адиабатном расширении понижается. Поскольку при адиабатном сжатии температура газа повышается, то давление газа с уменьшением объема растет быстрее, чем при изотермическом процессе. Понижение температуры газа при адиабатном расширении приводит к тому, что давление газа убывает быстрее, чем при изотермическом расширении.

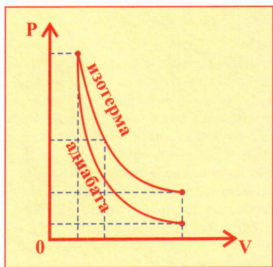


Рис. 27. Сравнительный график адиабатного и изотермического процессов.

Одним из важнейших в термодинамике является адиабатный процесс. **Адиабатным процессом** называется процесс, происходящий в термодинамической системе при отсутствии теплообмена с окружающими телами, т.е. при условии $Q = 0$.

Примером адиабатного процесса может служить процесс сжатия воздуха в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. В соответствии с первым законом термодинамики, при адиабатном сжатии изменение внутренней энергии газа ΔU равно работе внешних сил A :

Исходя из перечисленных выше законов можно установить связь между давлением, объемом и температурой некоторой массы газа в случае, когда изменяются все эти три величины. Эта закономерность получила название «закон газового состояния».

Закон газового состояния (уравнение состояния газа). Произведение объема V некоторой массы газа на его давление p пропорционально абсолютной температуре газа T :

$$\frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

В практической деятельности человеку нередко приходится иметь дело со смесями нескольких газов. Самым простым примером подобной смеси является воздух, представляющий собой смесь азота, кислорода, аргона, углекислого газа и других газов. Таким образом, возникает вопрос о том, от чего зависит давление смеси газов.

Исследование давления смеси газов было произведено английским химиком Джоном Дальтоном (1766–1844) в 1809 году. Давление, которое имел бы каждый из газов, составляющих смесь (если бы удалось удалить остальные газы из объема), называется парциальным (от лат. *pars* — часть) давлением этого газа. Дальтон определил, что давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений (так называемый закон Дальтона). Необходимо отметить, что к сильно сжатым газам закон Дальтона неприменим, так же как и закон Бойля — Мариотта. ■

Термин «газ» придумали ученые, так же как, например, термины «термометр», «электричество», «гальванометр», «телефон», «атмосфера». Впервые в обиход этот термин ввел голландский химик и врач Гельмонт (1577–1644). Он произвел слово «газ» от греческого слова «хаос» («сияющее пространство»). Долгое время данный термин не принимался научной средой, и лишь в 1789 году, стараниями Лавуазье, он был принят к использованию. Широкое распространение слово «газ» получило, когда начались первые полеты братьев Монгольфье на воздушных шарах.

Кроме того, для газообразных тел применялось и другое наименование — «упругие жидкости» (так, например, выдающийся русский ученый М.В. Ломоносов в своих работах использовал именно это название). ■

СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Свойства жидкости обусловлены ее строением, которое представляет собой нечто среднее между строением газов и твердых тел. Молекулы жидкости совершают колебательное движение относительно положений равновесия, а также совершают перескоки из одного равновесного положения в соседнее. Равновесные состояния молекулы определяются силами межмолекулярных взаимодействий — притяжения и отталкивания между молекулами. Чем выше температура жидкости, тем больше кинетическая энергия молекул. При увеличении кинетической энергии молекулы совершают перескоки из одного равновесного положения в другое. В результате нагревания свойства жидкости становятся все больше похожими на свойства газа.

В обычном состоянии молекулы жидкости расположены вплотную друг к другу, как и в твердых телах. Поэтому объем жидкости мало зависит от давления. Постоянство занимаемого объема является свойством, общим для жидких и твердых тел, и отличает их от газов, способных занимать любой предоставленный им объем. ■

Жидкость обладает уникальным свойством, отличающим ее и от газов и от твердых тел, — **текучестью**. Это возможно благодаря свободному перемещению молекул относительно друг друга. Большая свобода движения молекул в жидкости по сравнению с твердыми телами приводит к большей скорости диффузии, что обеспечивает возможность растворения твердых веществ в жидкостях. Тело в жидком состоянии, как и в газообразном, не имеет постоянной формы. Форма жидкого тела определяется формой сосуда, в котором находится жидкость, действием внешних сил и сил поверхностного натяжения. ■

Сила поверхностного натяжения связана с силами притяжения между молекулами и подвижностью молекул в жидкостях.

Внутри жидкости силы притяжения, действующие на одну молекулу со стороны соседних с ней молекул, взаимно компенсируются. Любая молекула, находящаяся у поверхности жидкости, притягивается молекулами, находящимися внутри жидкости, так как со стороны молекул газа силы притяжения почти не действуют. Вследствие этого сложение всех сил для молекулы, находящейся у поверхности, дает равнодействующую, направленную внутрь жидкости.

Из-за стремления молекул уйти от поверхности внутрь жидкость принимает такую форму, при которой ее свободная поверхность имеет наименьшую возможную величину, т.е. шар. Об этом свидетельствует шарообразная форма капель; в невесомости жидкость приобретает форму шара; масло, налитое в воду, также собирается в шар.

Силу, стремящуюся сократить поверхность жидкости до минимума и действующую вдоль поверхности жидкости перпендикулярно к линии, ограничивающей эту поверхность, называют **силой поверхностного натяжения** σ :

$$\sigma = \frac{F}{2l},$$

где F — сила, которую нужно приложить к прямолинейному участку границы пленки жидкости, чтобы равномерно растягивать эту пленку, l — длина этого участка.

Жидкость способна принимать форму любого сосуда, в том числе и стакана, благодаря своему уникальному свойству текучести.

Поверхностное натяжение жидкостей зависит от температуры — чем выше температура жидкости, тем меньше силы поверхностного натяжения. Силы поверхностного натяжения ярче всего проявляются при контакте жидкостей с газовой средой. При контакте жидкости с твердым телом наблюдается иная картина. Со стороны молекул твердого тела молекулы жидкости испытывают несравненно большие силы притяжения и отталкивания, чем со стороны газов. Если силы притяжения молекул жидкостей между собой меньше сил притяжения молекул жидкости к поверхности твердого тела, то происходит **смачивание** жидкостью поверхности твердого тела. Если же силы взаимодействия молекул жидкости и молекул твердого тела меньше сил взаимодействия между молекулами жидкости, то жидкость не смачивает поверхность твердого тела. ■

Способность жидкости смачивать твердые тела является причиной капиллярных явлений. Капилляром называется трубка с малым внутренним диаметром (от латинского «капилля» — «волос»). При полном смачивании жидкостью поверхности твердого тела силу поверхностного натяжения можно считать направленной вдоль поверхности твердого тела перпендикулярно к границе соприкосновения твердого тела и жидкости. В этом случае подъем жидкости вдоль смачиваемой поверхности продолжается до тех пор, пока сила тяжести $\vec{F}_T$, действующая на столб жидкости в капилляре и направленная вниз, не станет равной по модулю силе поверхностного натяжения $\vec{F}_H$, действующей вдоль границы соприкосновения жидкости с поверхностью капилляра. Высота поднятия жидкости h в капилляре тем больше, чем больше поверхностное натяжение жидкости σ и чем меньше радиус r трубки и плотность жидкости ρ :

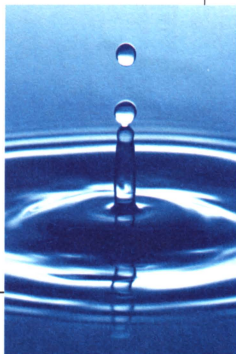
$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

Эта зависимость также носит название **закона Жюрена**. ■

Со школьной скамьи известно, что в природе существует круговорот воды. Это явление связано со способностью веществ к переходу из одного агрегатного состояния в другое. Переход жидкости в газообразное состояние называется **испарением**. Все жидкости без исключения испаряются. Испарение жидкости в закрытом сосуде при неизменной температуре приводит к постепенному увеличению концентрации молекул испаряющегося вещества в газообразном состоянии. Через некоторое время после начала процесса испарения концентрация вещества в газообразном состоянии достигает такого значения, при котором число молекул, возвращающихся в жидкость в единицу времени, становится равным числу молекул, покидающих поверхность жидкости за то же время. Устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации вещества. Вещество в газообразном состоянии, находящееся в динамическом равновесии с жидкостью, называется **насыщенным паром**. Пар, находящийся при давлении ниже давления насыщенного пара, называется **ненасыщенным**. Плотность и давление насыщенного пара при неизменной температуре являются постоянными величинами, у разных жидкостей — разными. Когда давление насыщенного пара равно внешнему давлению или превышает его, то пузырьки пара внутри жидкости расширяются и всплывают на поверхность. Этот процесс называется **кипением**. Температуру пара кипящей жидкости называют **точкой кипения**. При повышении внешнего давления температура кипения повышается, при понижении — понижается. ■

Кроме явления смачивания твердых тел жидкостями существует и другое явление, аналогичное этому, но только происходящее с молекулами газа. Твердое тело, находящееся в газе, покрыто слоем молекул газа, некоторое время способных удерживаться на нем силами межмолекулярного притяжения. Это явление называется **адсорбцией**. Количество адсорбированного газа зависит от величины поверхности твердого тела (особенно велика адсорбирующая поверхность у пористых веществ), от природы газа и от свойств твердого тела. Кроме того, твердые тела могут адсорбировать не только газы, но и различные растворенные вещества из жидкости. ■

При малейшей возможности жидкость стремится принять форму шара.



Точечные дефекты возникают при замещении собственного атома чужеродным, внедрении атома в пространство между узлами решетчатой или при отсутствии атома в одном из узлов кристаллической решетки. ■

СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Отличие твердых тел (и жидкостей) от газов заключается в том, что при незначительных изменениях объема в твердых телах (и жидкостях) возникают значительные силы упругости, тогда как в газах даже при значительном изменении объема (до определенного предела) увеличения сил упругости почти не происходит. От жидкостей твердые тела отличаются тем, что силы упругости в них возникают и при изменении формы (сдвига), чего не происходит в жидкости, способной принимать любую форму.

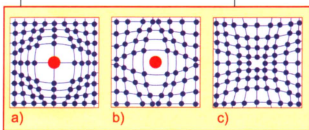


Рис. 28. Примеры точечных дефектов: а) замещение собственного атома чужеродным, б) внедрение атома в пространство между узлами кристаллической решетки, в) отсутствие атома в одном из узлов кристаллической решетки.

Линейные дефекты возникают при нарушении в порядке расположения атомных плоскостей в кристаллах. ■

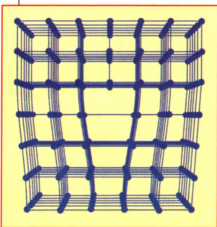


Рис. 29. Пример линейного дефекта в кристаллической решетке.

Твердые тела могут существовать в двух различных состояниях — кристаллическом и аморфном. ■

Аморфными называются тела, физические свойства которых одинаковы по всем направлениям (так называемая изотропность). Примерами аморфных тел могут служить куски затвердевшей смолы, янтарь, изделия из стекла. Изотропность физических свойств аморфных тел объясняется беспорядочностью расположения составляющих их атомов и молекул. Кристаллическое состояние характеризуется упорядоченным расположением атомов или молекул, которые образуют периодически повторяющуюся внутреннюю структуру. Физические свойства кристаллических тел неодинаковы в различных направлениях, но совпадают в параллельных направлениях. Это свойство кристаллов называется анизотропностью. Причиной анизотропности является то, что при упорядоченном расположении атомов, молекул или ионов силы взаимодействия между ними и межатомные расстояния оказываются неодинаковыми по различным направлениям. ■

Кристаллические тела делятся на **монокристаллы**, у которых внутренняя структура периодически повторяется во всем их объеме, и **поликристаллы**, представляющие собой множество сросшихся между собой хаотически расположенных маленьких кристаллов — кристаллитов.

Частицы, составляющие кристалл, расположены в определенном порядке и на определенном расстоянии друг от друга. Совокупность узлов, т.е. точек, совпадающих с центрами атомов или молекул, составляющих кристалл, называют **кристаллической решеткой** данного кристалла.

Многие каркасы зданий и мостов, транспортные средства, линии электропередач и так далее сделаны из металлов, имеющих кристаллическую структуру. Поэтому большой практический интерес представляют вопросы прочности кристаллических тел. Как выяснилось, реальная прочность кристаллов во много раз меньше расчетной из-за наличия внутренних и поверхностных дефектов в кристаллической решетке.

О механических свойствах твердых тел подробнее можно прочесть в главе, посвященной механике твердого тела. ■

Типичным примером монокристалла является алмаз.



ТЕРМОДИНАМИКА

Термодинамикой называется раздел физики, изучающий общие свойства вещества, связанные с тепловым движением в условиях термодинамического равновесия. Под термодинамическим равновесием понимают такое состояние системы, при котором параметры, определяющие ее состояние, остаются со временем постоянными и равными своим средним значениям.

Термодинамическая система — это совокупность физических тел, изолированных от взаимодействия с другими телами. Изменение, происходящее в термодинамической системе, называется термодинамическим процессом. Любое тело обладает внутренней энергией, которая является суммой потенциальной энергии взаимодействия частиц, составляющих тело, и кинетической энергии их беспорядочного теплового движения. Внутренняя энергия тела подчиняется закону сохранения и превращения энергии, который мы рассматривали в главе о работе и энергии и который в термодинамике получил новую формулировку. ■

Закон сохранения и превращения энергии. При любых процессах в изолированной термодинамической системе внутренняя энергия остается неизменной:

$$U = \text{const.}$$

Без взаимодействия с другими телами внутренняя энергия тела измениться не может. Существует два способа изменения внутренней энергии — теплопередача (так называемый **микроскопический** способ передачи энергии) и совершение механической работы (**макроскопический** способ). ■

Теплопередача (или теплообмен) происходит между телами, имеющими разную температуру. При этом мерой переданной энергии является количество теплоты Q . При теплопередаче внутренняя энергия одних тел уменьшается, а других — увеличивается, причем механическая энергия тел не изменяется и никакая работа не совершается. На принципе теплопередачи основаны различные отопительные приборы — начиная от старинной русской печи и заканчивая современными калориферами. Существует три вида теплопередачи — теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. ■

Теплопроводностью называют передачу теплоты от одного тела к другому при их контакте или от одной, более нагретой, части к другой, менее нагретой, без переноса молекул. Это происходит за счет того, что молекулы с более высокой температурой обладают большей кинетической энергией и передают ее соседним молекулам, обладающим меньшей кинетической энергией (а следовательно — и температурой). ■

Конвекция — перенос теплоты потоком жидкости или газа путем перемешивания и перемещения холодных и теплых слоев жидкости или газа. Из-за того, что теплые слои имеют меньшую плотность, чем холодные, они поднимаются вверх, перенося теплоту. Перемещение воздушных масс в атмосфере (ветер) связано с конвекцией. Это явление применяется в технике (например, водяное отопление помещений). ■

Количеством теплоты Q называется энергия, которую передает одно тело другому непосредственно при контакте или путем излучения. Единицей количества теплоты является джоуль (Дж).

Теплоемкость — это количество теплоты, которое нужно передать какому-либо телу, чтобы повысить его температуру на один кельвин. **Удельной теплоемкостью (c)** называют теплоемкость единицы массы вещества:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T},$$

где m — масса тела, Q — количество теплоты, ΔT — изменение температуры тела. ■

Для применения в термодинамике более удобной является молярная теплоемкость (C), т.е. теплоемкость одного моля вещества. Между молярной и удельной теплоемкостями существует связь, выражаемая формулой:

$$c = \frac{C}{M},$$

где c — удельная теплоемкость вещества, C — молярная теплоемкость, M — молярная масса вещества. ■

Для измерения внутренней энергии часто используют единицу энергии — **калорию** (кал). Калория равна изменению внутренней энергии 1 г воды при повышении ее температуры на 1 °С. Калория может применяться для измерения не только внутренней, но и любой другой (например, механической) энергии. ■

Сидя вечером у костра, можно на себе ощутить воздействие теплового излучения.

Тепловое излучение — перенос теплоты с помощью электромагнитных волн (инфракрасного излучения). К примеру, мы можем ощутить тепловое излучение сидя у костра или лежа под жарким июльским солнцем.

При совершении **механической работы** нередко наблюдается повышение температуры тела. Это связано с наличием сил трения. Повышение температуры тела, способное привести к переходу вещества из одного агрегатного состояния в другое, с большей кинетической энергией движения молекул (из твердого в жидкое, из жидкого в газообразное), свидетельствует о том, что в результате совершения работы против сил трения внутренняя энергия тела увеличилась. Если же температура тела понижается, то его внутренняя энергия уменьшается.

Связь внутренней энергии с количеством теплоты, переданной телу, и работой против внешних сил нашла отражение в **первом законе** (или **начале**) **термодинамики**. ■

Первое начало термодинамики (закон сохранения энергии в применении к термодинамическим процессам). При сообщении термодинамической системе (например, пару в тепловой машине) определенного количества теплоты в общем случае происходит приращение внутренней энергии системы, и она совершает работу против внешних сил:

$$\Delta U = Q - A',$$

где ΔU — изменение внутренней энергии, Q — количество теплоты, A' — работа, совершаемая системой. ■

Следствием этого закона является невозможность создания вечных двигателей первого рода, т.е. машин, способных совершать полезную работу без потребления энергии извне и без каких-либо изменений внутри машины. Из первого начала термодинамики следует, что любая машина может совершать работу над внешними силами только за счет получения извне количества теплоты или уменьшения своей внутренней энергии.

В настоящее время основным источником энергии для нужд человечества является тепловая энергия, выделяющаяся при сгорании различных видов топлива. При помощи тепловых машин ее превращают в механическую энергию, которая затем может быть преобразована в любой другой вид энергии.

Первый закон термодинамики лежит в основе действия всех тепловых двигателей.

В большинстве тепловых машин механическая работа совершается расширяющимся газом, называемым **рабочим телом**. Расширение газа происходит в результате повышения его температуры и давления при нагревании. Устройство, передающее рабочему телу (газу) количество теплоты Q , называется **нагревателем**. Для периодической работы тепловой машины необходим **холодильник**, охлаждающий газ после совершения им работы до начальной температуры.

В результате совершения одного рабочего цикла газ возвращается в начальное состояние, а его внутренняя энергия принимает первоначальное значение, т.е. изменение внутренней



энергии рабочего тела за цикл равно нулю. В соответствии с первым началом термодинамики работа, совершенная рабочим телом за цикл, равна количеству теплоты, полученному за этот цикл, и представляет собой разность между количеством теплоты, полученным от нагревателя, и количеством теплоты, отданным холодильнику.

Для пытливого человеческого разума идея создания тепловой машины, совершающей работу с использованием нагревателя, оказалась очень заманчивой. Тем более что проблема дешевой энергии всегда остается одной из основных, стоящих перед человечеством.

Возможность создания такой машины, называемой также **вечным двигателем второго рода**, не противоречит первому закону термодинамики, однако наталкивается на другое препятствие. Дело в том, что основное отличие тепловых явлений от механических и электромагнитных заключается в необратимости тепловых явлений (тепловые процессы самопроизвольно идут лишь в одном направлении — от горячего к холодному). Необратимость тепловых явлений связана с тем, что энергия теплового движения молекул способна лишь к частичному превращению в любой другой вид энергии. В результате этого любой физический процесс, в котором происходит превращение какого-либо вида энергии в энергию теплового движения молекул, не может быть осуществлен полностью в обратном направлении. Невозможность создания вечного двигателя второго рода в термодинамике лег в основу формулировки второго закона (начала) термодинамики. ■

Второе начало термодинамики. Невозможно построить вечный двигатель второго рода, т.е. тепловую машину, которая в результате совершения кругового процесса (цикла) полностью преобразует теплоту, получаемую от какого-либо одного «неисчерпаемого» источника (океана, атмосферы и т.д.), в работу.

Формулировка 2. Невозможен переход теплоты от тела более холодного к телу, более нагретому, без каких-либо других изменений в системе или окружающей среде.

Со вторым началом термодинамики связана также концепция «**тепловой смерти**» Вселенной. Она основана на том, что тепловые процессы односторонни, и все тела во Вселенной стремятся к состоянию термодинамического равновесия. Рано или поздно тепловые процессы во Вселенной прекратятся, что будет означать принятие всеми ее телами одинаковой температуры и превращение всех форм энергии в тепловую. Наступление состояния термодинамического равновесия приводит к прекращению всех макропроцессов, что и означает состояние «тепловой смерти». ■

В настоящее время существует множество различных видов тепловых машин, применяемых во всех областях человеческой деятельности. Но, согласно второму началу термодинамики, ни одна из них не может иметь КПД, равный 100%. Коэффициент полезного действия η , равный отношению полезно использованной энергии к затраченной энергии, для тепловой машины оказывается равным:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

В 1824 году французский инженер Саді Карно (1796–1832) установил важную для практической деятельности зависимость КПД тепловой ма-

Коэффициентом полезного действия η машины называется отношение полезно используемой энергии $E_{\text{полезн}}$ к энергии E , подводимой к данной машине:

$$\eta = \frac{E_{\text{полезн}}}{E}.$$

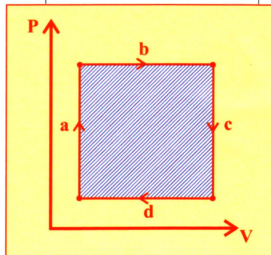


Рис. 30. График состояния рабочего тела в упрощенной модели тепловой машины: а) температура рабочего тела возрастает, объем неизменен, происходит изохорный процесс, б) давление постоянно, расширение рабочего тела происходит по изобарному закону, в) охлаждение рабочего тела при неизменном объеме, изохорный процесс, д) для возвращения рабочего тела в исходное состояние охлаждение продолжается при постоянном давлении, т.е. вновь происходит изобарный процесс. Цикл завершен.

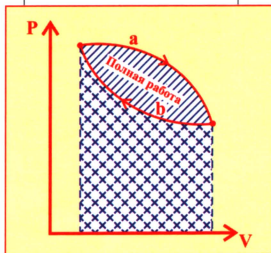


Рис. 31. Работа, совершаемая тепловой машиной за цикл, представляет собой разность между положительной работой, затраченной на расширение (нагревание) рабочего тела, и отрицательной работой, затраченной на сжатие (охлаждение) рабочего тела.

Примером паровой машины является паровоз.



шины от температуры T_1 нагревателя и температуры T_2 холодильника: независимо от конструкции и выбора рабочего тела максимальное значение КПД тепловой машины определяется выражением:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Ни одна реальная тепловая машина не может иметь КПД, превышающий это максимальное значение.

Выражение для максимального значения КПД тепловой машины показывает, что для повышения коэффициента полезного действия тепловых машин существует два пути — повышение температуры T_1 нагревателя и понижение температуры T_2 холодильника. КПД тепловой машины мог бы стать равным 100%, если бы имелась возможность использовать холодильник с температурой, равной абсолютному нулю. Однако, согласно представлениям термодинамики, абсолютный нуль не может быть достигнут.

Наиболее практичными холодильниками для реальных тепловых машин являются атмосферный воздух или вода при температуре около 300 К. таким образом, мы видим, что основной путь повышения КПД тепловых машин — это повышение температуры нагревателя.

Первые действующие паровые машины были созданы русским изобретателем И.И. Ползуновым и англичанином Д. Уаттом. Машина Ползунова была построена в 1766 году. Она имела высоту 11 метров, емкость парового котла 7 м³, мощность 29 кВт и использовалась для нагнетания воздуха в медеплавильные печи. Широкое применение паровые двигатели получили во второй половине XIX — первой половине XX века в железнодорожном транспорте. ■

Основным недостатком первых паровых машин был низкий КПД, значение которого не превышало 9%. Этот недостаток удалось устранить после изобретения паровой турбины. В ней пар из котла под высоким давлением через сопло выпускается на лопасти турбины, приводя ее во вращение. На одном валу с турбиной расположен ротор электрического генератора, преобразующий механическую энергию вращения турбины в электрическую. У паротурбинных установок значение КПД достигает 65%. В наши дни паровые турбины применяются практически на всех тепловых и атомных электростанциях мира.

Наибольшее распространение среди тепловых машин получил **двигатель внутреннего сгорания**. Его КПД увеличился за счет устранения части потерь теплоты. Это было достигнуто путем перенесения места сжигания топлива и нагревания рабочего тела внутрь цилиндра.

В 1862 году, спустя два года после создания первого двигателя внутреннего сгорания, французом Бо де Роша была предложена схема четырехтактного цикла: **всасывание — сжатие — горение и расширение — выхлоп**. В бензиновом двигателе рабочим телом является, как ни странно это прозвучит, воздух. Связано это с тем, что для полного сгорания воздушно-бензиновой смеси необходимо 15 частей воздуха и только 1 часть бензина. В двигателе внутреннего сгорания топливо сжигается для нагревания газа. Побочным эффектом нагревания воздуха является изменение его химического состава — вместо кислорода, необходимого для горения, появляется углекислый газ и водяной пар.

Одной из важных характеристик двигателя внутреннего сгорания является степень сжатия горючей смеси ε , определяющей полноту сгорания топлива:

$$\varepsilon = \frac{V_2}{V_1},$$

где V_2 и V_1 — объем в начале и в конце сжатия. Большая степень сжатия способствует более полному сгоранию горючей смеси, что сказывается на величине КПД.

Наибольшее применение **карбюраторные двигатели** внутреннего сгорания получили в автомобильном транспорте.

В 1892 году немецкий инженер Рудольф Дизель предложил схему двигателя оригинальной конструкции, позволяющего достигать еще больших степеней сжатия рабочего тела. В его двигателе высокая степень сжатия достигается за счет того, что сжатию подвергается не горючая смесь, а только воздух. При высокой степени сжатия температура воздуха достигает 600 — 700 °С, и впрыскиваемое горючее воспламеняется от одного только соприкосновения с раскаленным воздухом. Степень сжатия, достигаемая в **дизельных** двигателях, почти в два раза превышает аналогичный показатель в карбюраторных двигателях. Дизельный двигатель является более экономичным, чем бензиновый, и может иметь значительно большую мощность. Поэтому дизели используют на судах, в сельскохозяйственной технике, грузовых автомобилях, тепловозах и пр.

Повсеместное применение тепловых машин в современном мире ведет к экологической катастрофе. Как мы уже упоминали, в результате нагревания воздуха в камере сгорания его химический состав изменяется. Если учесть, что каждый год человечество сжигает более 10 млрд тонн условного топлива (1 кг = 18,7 тыс. кДж тепла), то получается, что в атмосферу выбрасывается более 25 млрд тонн CO_2 и более 800 млн тонн прочих газообразных соединений, включая канцерогенные углеводы. В результате происходит постепенное разрушение биосферы Земли, в дальнейшем способное привести к гибели всего человечества. ■

Карбюратором называется специальный смеситель, в котором перед впрыском в цилиндр смешивается топливо и воздух. ■

Самым распространенным видом тепловых машин является двигатель внутреннего сгорания.



Из-за своей большой мощности дизельные двигатели используются в грузовом транспорте.



АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

В связи с проблемой экологической катастрофы важное место отводится поиску альтернативных источников энергии. Рассмотрим вкратце некоторые из них.

Ветровая энергия. Запасы энергии ветра более чем в сто раз превышают запасы гидроэнергии всех рек планеты. По различным оценкам, общий ветроэнергетический потенциал Земли равен $12 \cdot 10^{14}$ Вт. Ветроэнергетическая установка, расположенная на площадке, где среднегодовая удельная мощность воздушного потока составляет около 500 Вт/м^2 (скорость воздушного потока при этом равна 7 м/с), может преобразовать

в электроэнергию около 175 из этих 500 Вт/м^2 . Удельная выработка электрической энергии в течение года составляет $15\text{--}30\%$ энергии ветра, в зависимости от местоположения и параметров ветроагрегата.

Сегодня ветроэлектрические агрегаты надежно снабжают током нефтяников, успешно работают в труднодоступных районах, на дальних островах, в Арктике, на тысячах сельскохозяйственных ферм, где нет поблизости крупных населенных пунктов и электростанций общего пользования.

Широкому применению ветроэлектрических агрегатов в обычных условиях пока препятствует их высокая себестоимость — за ветер платить не нужно, однако машины, нужные для того, чтобы использовать его энергию, обходятся слишком дорого. ■

Энергия рек. Вода, вероятно, была первым источником энергии, используемой человеком, а первой машиной, с помощью которой использовалась энергия воды, — была примитивная водяная турбина. Устройства, в которых используется энергия воды для совершения работы, принято называть **водяными** (или **гидравлическими**) двигателями.

В современной гидроэлектростанции масса воды с большой скоростью, через защитную сетку и регулируемый затвор, по стальному трубопроводу устремляется на лопасти турбин, которые соединены с электрогенераторами. Механическая энергия воды посредством турбины передается генератору, где преобразуется в электрическую. После совершения работы вода стекает в реку через постепенно расширяющийся туннель, теряя при этом свою скорость.

Все более широкое применение находят ветроэлектростанции.



Гидроэлектростанции классифицируются по мощности на мелкие (с установленной электрической мощностью до 0,2 МВт), малые (до 2 МВт), средние (до 20 МВт) и крупные (свыше 20 МВт). Вторым критерий, по которому разделяются гидроэлектростанции, — напор. Различают низконапорные ГЭС (высота плотины до 10 м), среднего напора (до 100 м) и высоконапорные (свыше 100 м). В редких случаях плотины высоконапорных ГЭС достигают высоты 240 м. Плотины гидроэлектростанций сосредотачивают перед турбинами водную энергию, накапливая воду и поднимая ее уровень. Затраты на строительство ГЭС велики, но они сравнительно быстро компенсируются, так как за источник энергии — воду — не приходится платить. Мощность современных ГЭС превышает 100 МВт, а КПД составляет 95% (водяные мельницы имеют КПД 50–85%). ■



Сегодня самым надежным поставщиком энергии являются гидроэлектростанции.

Геотермальная энергия. Энергетика Земли — геотермальная энергетика базируется на использовании природной теплоты Земли. Количество теплоты, содержащейся в земной коре до глубины 10 км (без учета температуры поверхности), равно приблизительно $12,6 \cdot 10^{26}$ Дж. Эти ресурсы эквивалентны теплосодержанию $4,6 \cdot 10^{16}$ т угля (принимая среднюю теплоту сгорания угля равной $27,6 \cdot 10^9$ Дж/т), что более чем в 70 тысяч раз превышает теплосодержание всех технически и экономически извлекаемых мировых ресурсов угля.

С геологической точки зрения, геотермальные энергоресурсы можно разделить на гидротермальные конвективные системы, горячие сухие системы вулканического происхождения и системы с высоким тепловым потоком. К категории **гидротермальных конвективных систем** относят подземные бассейны пара или горячей воды, которые выходят на поверхность земли, например, в виде гейзера. К **горячим системам вулканического происхождения** относятся магма и непроницаемые горячие сухие породы (зоны застывшей породы вокруг магмы и покрывающие ее скальные породы). **Системы с высоким тепловым потоком** существуют в тех районах, где в зоне с высокими значениями теплового потока располагается глубоководная



В гейзере заключена огромная энергия — необходимо только суметь ею воспользоваться.

В настоящее время ученые заняты поиском принципиально новых энергетических систем. Одним из самых перспективных проектов в этом направлении является использование водорода в качестве топлива и создание так называемого водородного энергетического хозяйства.

Водород является идеальным топливом (при сжигании 1 г водорода получается 120 Дж тепловой энергии, а при сжигании 1 г бензина — всего только 47 Дж). Он имеется всюду, где есть вода. При сжигании водорода образуется вода, которую можно снова разложить на водород и кислород. Этот процесс не вызывает никакого загрязнения окружающей среды, т.к. водородное пламя не выделяет в атмосферу продуктов, которыми неизбежно сопровождается горение любых других видов топлива: углекислого газа, окиси углерода, сернистого газа, углеводородов, золы, органических перекисей и т.п. Образующийся при горении водяной пар можно считать полезным продуктом — он увлажняет воздух (в современных квартирах с центральным отоплением воздух имеет пониженную влажность).

Водород удобен в транспортировке — его можно транспортировать и распределять по трубопроводам, как природный газ.

В будущем, когда водород станет столь же доступным топливом, как сегодня природный газ, он сможет всюду его заменить. Водород можно будет сжигать в кухонных плитах, в водонагревателях и отопительных печах, снабженных горелками. ■

Кроме сокровищ затонувших кораблей в океане хранятся неисчислимые сокровища энергии.

легающий осадочный бассейн. В таких районах, как Парижский или Венгерский бассейны, температура воды, поступающая из скважин, может достигать 100 °С. ■

Энергия Мирового океана. Запасы энергии в Мировом океане колоссальны, ведь две трети земной поверхности (361 млн км²) занимают моря и океаны. Тепловая энергия, соответствующая перегреву поверхностных вод океана по сравнению с донными, например, на 20 °С, имеет величину порядка 10²⁶ Дж. Кинетическая энергия океанских течений оценивается величиной порядка 10¹⁸ Дж.

Максимально возможная мощность в одном цикле прилив — отлив, т.е. от одного прилива до другого, выражается уравнением:

$$W = \rho g S R^2,$$

где ρ — плотность воды, g — ускорение силы тяжести, S — площадь приливного бассейна, R — разность уровней при приливе.

Для использования приливной энергии наиболее подходящими можно считать такие места на морском побережье, где приливы имеют большую амплитуду, а контур и рельеф берега позволяют устроить большие замкнутые «бассейны».

Мощность электростанций в некоторых местах могла бы составить 2–20 МВт. Однако пока что люди умеют использовать лишь ничтожные доли этой энергии, да и то ценой больших и медленно окупающихся капиталовложений, так что такая энергетика до сих пор не получила должного развития. ■

Энергия морских течений. Неисчерпаемые запасы кинетической энергии морских течений, накопленные в океанах и морях, можно превращать в механическую и электрическую энергию с помощью турбин, погруженных в воду.

Важнейшее и самое известное морское течение — Гольфстрим. Его основная часть проходит через Флоридский пролив между полуостровом Флорида и Багамскими островами. Ширина течения составляет 60 км, глубина — до 800 м, а поперечное сечение — 28 км². Энергию P , которую несет такой поток воды со скоростью 0,9 м/с, можно выразить формулой (в ваттах):

$$P = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3,$$



где m — масса воды, ρ — плотность воды, A — сечение, v — скорость. Для Гольфстрима этот показатель равен 50000 МВт.

Если бы человечество полностью смогло использовать эту энергию, она была бы эквивалентна суммарной энергии от 50 крупных электростанций по 1000 МВт. Но эта цифра чисто теоретическая, а практически можно рассчитывать на использование лишь около 10% энергии течения. ■

Атомная энергетика. Одной из самых быстроразвивающихся отраслей энергетики сегодня является атомная энергетика. За тридцать лет общая мощность ядерных энергоблоков выросла с 5 тысяч до 23 миллионов киловатт.

При исследовании распада атомных ядер оказалось, что каждое ядро весит меньше, чем сумма масс его протонов и нейтронов. Это объясняется тем, что при объединении протонов и нейтронов в ядро выделяется много энергии. Убыль массы ядер на 1 г эквивалентна такому количеству тепловой энергии, какое получилось бы при сжигании 300 вагонов каменного угля.

Энергетический ядерный реактор устроен довольно просто — в нем, так же как и в обычном котле, вода превращается в пар. Для этого используют энергию, выделяющуюся при цепной реакции распада атомов урана или другого ядерного топлива.

Ядерный реактор — устройство, в котором протекает управляемая цепная реакция. При этом распад атомных ядер служит регулируемым источником и тепла, и нейтронов. Атомные реакторы на тепловых нейтронах различаются между собой главным образом по двум признакам: какие вещества используются в качестве замедлителя нейтронов и какие — в качестве теплоносителя, с помощью которого производится отвод тепла из активной зоны реактора. Наибольшее распространение в настоящее время имеют **водо-водяные реакторы**, в которых обычная вода служит и замедлителем нейтронов, и теплоносителем, **уран-графитовые реакторы** (замедлитель — графит, теплоноситель — обычная вода), **газографитовые реакторы** (замедлитель — графит, теплоноситель — газ, часто углекислота), **тяжеловодные реакторы** (замедлитель — тяжелая вода, теплоноситель — либо тяжелая, либо обычная вода).

Мало у кого вызывает сомнения то, что атомная энергетика заняла прочное место в энергетическом балансе человечества. Несмотря на аварии (самой разрушительной из которых была Чернобыльская), она будет развиваться и впредь, поставляя столь необходимую людям энергию. Однако необходимы дополнительные меры по обеспечению безаварийной работы атомных электростанций, увеличению их надежности. ■

Гелиоэнергетика. Почти все источники энергии так или иначе используют энергию Солнца: уголь, нефть, природный газ по своей сути являются «законсервированной» солнечной энергией.

Энергия рек и водопадов также связана с Солнцем, поддерживающим круговорот воды на Земле.

Весьма перспективной является возможность непосредственного преобразования

Первое устройство, превращавшее солнечную энергию в механическую, появилось еще в конце XIX века — так называемый инсолятор. В этом устройстве большое вогнутое зеркало фокусировало солнечные лучи на паровом котле, паром которого приводилась в движение печатная машина, делавшая свыше 500 оттисков газеты в час. Спустя несколько лет в Калифорнии построили действующий по такому же принципу конический рефлектор, соединив его с паровой машиной мощностью 15 лошадиных сил. ■

Атомные электростанции превратились для человечества в незаменимый, хотя и небезопасный, источник энергии.





Гелиоэлектростанции: пока их слишком мало.

По мнению специалистов, наиболее перспективной идеей преобразования солнечной энергии является использование фотоэлектрического эффекта в полупроводниках. Основной же преградой для их использования пока остается высокая себестоимость полупроводниковых элементов. Электростанция на солнечных батареях, например, вблизи экватора с суточной выработкой 500 МВт·ч (это энергия крупной ГЭС) при КПД 10% потребовала бы эффективной поверхности около 500000 м². Эффективность солнечных электростанций в других зонах Земли будет еще меньше. ■

Солнечные фотоэлементы суже сегодня находят свое применение. Они оказались практически незаменимыми источниками электрического тока в ракетах, спутниках и автоматических межпланетных станциях, а на Земле — в первую очередь для питания телефонных сетей в неэлектрифицированных районах или же для малых потребителей тока (радиоаппаратура, электрические бритвы и зажигалки и т.п.). ■

теплового и светового излучения Солнца в механическую или электрическую энергию, ведь всего за три дня Солнце посылает на Землю столько энергии, сколько ее содержится во всех разведанных запасах ископаемого топлива: только за 1 секунду — 170 млрд Дж.

Основная часть солнечной энергии теряется (поглощается и рассеивается) в атмосфере, только третья часть достигает земной поверхности. Вся энергия, получаемая Землей от Солнца, в $5 \cdot 10^4$ раз меньше суммарной энергии, испускаемой Солнцем. И все же эта

энергия в 1600 раз больше той энергии, которую дают все остальные источники, вместе взятые.

Сегодня для преобразования солнечного излучения в электрическую энергию существует две возможности: использовать солнечную энергию как источник тепла для последующей выработки электроэнергии традиционными способами (например, с помощью турбогенераторов) или же непосредственно преобразовывать солнечную энергию в электрический ток с помощью солнечных батарей. В связи с низкой плотностью солнечной энергии любая установка должна иметь собирающее устройство (**коллектор**) с достаточно большой поверхностью.

Простейшее устройство такого рода — плоский коллектор — представляет собой черную плиту, хорошо изолированную снизу. Плита прикрыта стеклом или пластмассой, которые пропускают свет и не пропускают обратно инфракрасное тепловое излучение. В пространстве между плитой и стеклом размещают черные трубки, в которых находится жидкость или газ, например вода, масло, ртуть, воздух, сернистый ангидрид и т.п.

Принцип действия плоского коллектора следующий. Солнечное излучение, проникая через стекло или пластмассу в коллектор, поглощается черными трубками и плитой, нагревая рабочее вещество. За счет отражения теплового излучения от стекла (либо пластмассы) внутри коллектора температура значительно повышается (до 230—500 °C).

Кстати, обычные садовые парники, по сути дела, представляют собой простые коллекторы солнечного излучения.

Более сложным и дорогостоящим коллектором является вогнутое зеркало, которое концентрирует падающее излучение в малом объеме в определенной геометрической точке — фокусе. Отражающая поверхность зеркала выполнена из отражающего материала, прикрепленного к параболическому основанию. Благодаря специальным механизмам коллекторы такого типа постоянно повернуты к Солнцу, что позволяет собрать максимальную энергию солнечного излучения. Температура в рабочем пространстве (в фокусе) зеркальных коллекторов достигает 3000 °C и выше. ■

Солнечные фотоэлементы незаменимы в космосе.



ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Раздел физики, в котором изучаются свойства электромагнитного поля и электромагнитные процессы в различных средах, называется электродинамикой.

Как уже упоминалось в предыдущих разделах, в природе существует четыре вида взаимодействия — гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. Электромагнитные силы действуют на расстоянии между покоящимися и движущимися частицами или телами, обладающими электрическим зарядом. ■

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Существование электрического заряда подтверждает множество природных явлений. Еще в древности люди обратили внимание на способность некоторых предметов притягивать к себе другие предметы. Древние греки знали свойство натертого янтаря притягивать мелкие предметы. Само слово «электричество» происходит от греческого слова «электрон», что в переводе на русский означает «янтарь». Впоследствии способность электрических зарядов как к взаимному притяжению, так и к взаимному отталкиванию объяснили существованием двух различных видов зарядов. Один вид электрического заряда назвали положительным, а другой — отрицательным.

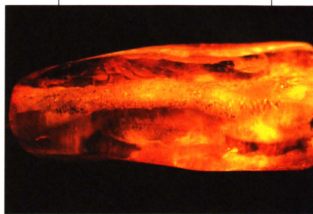
Существование электрического заряда в двух видах является его основополагающим свойством. Заряды, возникающие на стекле, потертом о мех, назвали **положительными**, а заряды, возникающие на поверхности эбонита, потертом о шелк, — **отрицательными**. Силы взаимодействия электрических зарядов таковы, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются. Во всех телах всегда содержатся как положительные, так и отрицательные заряды. В обычных условиях в каждой части объема тела содержится одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов. О таком теле говорят, что оно не заряжено, или электрически нейтрально.

Электрические заряды существуют в природе в виде свободных заряженных частиц. Наименьший отрицательный заряд имеет частица, получившая название электрон, а наименьший положительный заряд имеет частица, называемая протоном. Заряды электрона и протона имеют одинаковую по модулю, но разную по знаку величину. Электризация тел при трении (соприкосновении) объясняется переходом части электронов с одного тела на другое.

Для обнаружения и измерения электрических зарядов применяется электрометр, состоящий из металлического стержня и стрелки, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси. Его история начинается с электрического указателя, созданного

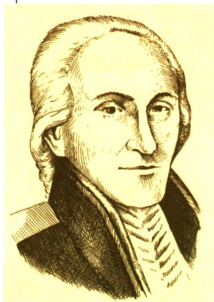
Электрический заряд — физическая величина, характеризующая интенсивность электромагнитных взаимодействий. В зависимости от способности проводить электрические заряды вещества делят на **проводники** и **диэлектрики** (изоляторы). Однако это разделение условно, так как во всех веществах (в большей или меньшей степени) возможно перемещение зарядов. К какой группе следует отнести то или иное вещество, зависит от конкретной ситуации. Кроме того, большинство материалов нельзя четко отнести к одной из этих групп, так как они занимают промежуточное положение между очень хорошими проводниками и очень хорошими изоляторами. ■

Янтарь.



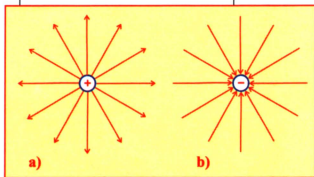
Электростатикой называется раздел физики, в котором изучают свойства и взаимодействие неподвижных электрических зарядов и создаваемых ими электрических полей.

Единицей электрического заряда принято считать кулон (Кл). Кулон — это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А. ■



Шарль Кулон (1736–1806).

Рис. 32. Распределение линий напряженности вокруг точечного заряда: а) положительно, б) отрицательно.



Г. Рихманом вскоре после изобретения Мушенбруком в 1745–1746 годах первого электрического конденсатора, так называемой **лейденской банки**. Электромметр Рихмана состоял из металлического прута, к верхнему концу которого подвешивалась льняная нить определенной длины и веса. При электризации прута нить отклонялась. Угол отклонения нити измерялся с помощью шкалы, прикрепленной к стержню и разделенной на градусы. Появление прибора, способного измерять электрические заряды, позволило обнаружить и сформулировать закон сохранения электрического заряда. ■

Закон сохранения электрического заряда. В замкнутой системе, в которую не входят извне электрические заряды и из которой не выходят заряды, при любых взаимодействиях тел алгебраическая сумма электрических зарядов всех тел остается постоянной:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const},$$

где q — электрический заряд. ■

Этот закон означает, что нигде и никогда в природе не возникает и не исчезает электрический заряд одного знака — появление положительного электрического заряда всегда связано с появлением равного по абсолютному значению отрицательного электрического заряда.

Впервые этот закон был продемонстрирован выдающимся американским государственным деятелем и изобретателем Бенджамин Фрэнклином на следующем опыте. Два человека стоят на смоляном диске (для изоляции их от окружающих предметов и земли). Один человек натирает стеклянную трубку. Другой касается этой трубки пальцем и извлекает искру. Оба человека теперь оказываются наэлектризованными: один — отрицательным электричеством, другой — положительным. Но при этом их заряды равны по абсолютной величине. После соприкосновения люди потеряют свои заряды и станут электрически нейтральными.

Основной закон электростатики — закон Кулона — был установлен французским физиком Шарлем Кулоном (1736–1806) в 80-х годах XVIII века. ■

Закон Кулона. Сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных зарядов F_3 прямо пропорциональна произведению абсолютных значений зарядов q_1 и q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F_3 = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

где k — коэффициент пропорциональности, равный $9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$.

Вместо этого коэффициента часто используется **электрическая постоянная** ϵ_0 :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}.$$

Таким образом, $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / \text{Н} \cdot \text{м}^2$.

Необходимо отметить, что первым экспериментально установил закон взаимодействия электрических зарядов английский ученый Генри Кавендиш (1731–1810). Однако он не обнаружил своего открытия. И эта работа оставалась при его жизни неизвестной. О ней узнали гораздо позже, только в середине XIX века, после того как Максвелл опубликовал ее.

Взаимодействие заряженных частиц происходит посредством **электрического поля**, являющегося материальным объектом, непрерывным в пространстве и способным действовать на другие электрические заряды. Электрическое поле — одна из форм проявления электромагнитного. Каждый из взаимодействующих зарядов создает в окружающем пространстве свое электромагнитное поле, способное действовать на другой заряд. Сила, с которой электрическое поле действует на заряд, не зависит от скорости заряда, поэтому электрическое поле способно воздействовать даже на неподвижные заряды.

Основной количественной характеристикой электрического поля является его напряженность E , равная отношению силы, с которой электрическое поле действует на точечный электрический заряд, к значению этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_1},$$

где q_1 — заряд, на который действует сила F_3 .

Напряженность электрического поля точечного заряда прямо пропорциональна заряду Q и обратно пропорциональна квадрату расстояния r от заряда до данной точки поля:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}.$$

В случае, когда электрическое поле создается сразу несколькими зарядами, его напряженность вычисляют исходя из **принципа суперпозиции полей**: напряженность поля, создаваемого несколькими зарядами, равна векторной сумме напряженностей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:

$$E_{\Sigma} = E_1 + E_2 + \dots + E_n.$$

Напряженность поля точечного заряда является **неоднородным**. Если напряженность поля во всех точках пространства одинакова, поле называют **однородным** (поле между двумя разноименно заряженными плоскими металлическими пластинами).

При равномерном распределении электрического заряда Q по поверхности площади S поверхностная плотность заряда σ постоянна и равна:

$$\sigma = \frac{Q}{S}.$$

Напряженность электрического поля бесконечной плоскости с поверхностной плотностью заряда σ одинакова в любой точке пространства и равна:

$$E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0}.$$

Так как на заряд, помещенный в электрическое поле напряженностью E , действует сила F , то при его перемещении будет производиться работа против силы F . Если перемещение заряда происходило по линии напряженности поля на расстояние $\Delta d = d_1 - d_2$, то работа будет равна:

$$A = qE(d_1 - d_2),$$

где d_1 и d_2 — расстояния от начальной и конечной точек до пластины.

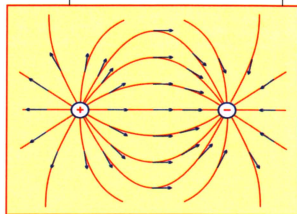


Рис. 33. Распределение линий напряженности двух разноименных зарядов.

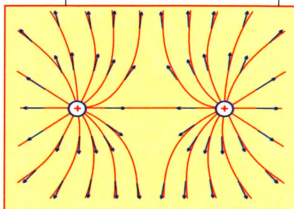


Рис. 34. Картина распределения линий напряженности электрического поля для двух одноименных зарядов.

Единицей напряжения является **вольт (В)**. 1 вольт — это разность потенциалов (напряжение) между двумя точками, при которой перемещение положительного заряда в 1 кулон между этими точками требует со стороны электрических сил затраты работы в 1 джоуль. ■

Простейшими способами разделения разноименных электрических зарядов являются электризация при соприкосновении и электростатическая индукция. ■

Рис. 35. Эквипотенциальная поверхность: поля точечного электрического заряда (а) и однородного электрического поля (б).

Работа сил электростатического поля при движении электрического заряда по любой замкнутой траектории равна нулю, что означает **потенциальность** электростатического поля. Любая частица в нем обладает потенциальной энергией.

С понятием потенциальной энергии непосредственно связано понятие потенциала электрического поля. Потенциал в данной точке равен потенциальной энергии W_p , которой обладает единичный положительный заряд q , помещенный в эту точку:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

Он, так же как и потенциальная энергия, определяется работой, производимой электрическими силами при перемещении заряда в пространстве.

Важную роль в физике и электротехнике играет **разность потенциалов (напряжение)** U двух точек электрического поля, которая равна отношению работы A , которую совершают электрические силы при перемещении заряда из одной точки в другую, к величине этого заряда q :

$$U = \frac{A}{q}.$$

В электростатическом поле напряжение между двумя любыми точками равно разности потенциалов этих точек:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \blacksquare$$

Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется эквипотенциальной поверхностью (рис. 35). ■

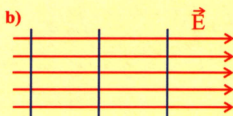
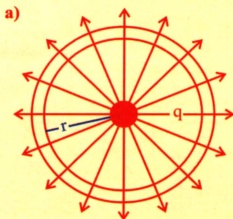
Для накопления значительного количества разноименных электрических зарядов применяется **конденсатор** — система из двух проводников (обкладок), разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Величина заряда, который надо перенести с одного проводника на другой, чтобы зарядить один из них положительно, а другой — отрицательно, называется **зарядом конденсатора**.

Одной из важнейших характеристик конденсатора является его электрическая емкость. **Емкостью** C конденсатора называется физическая величина, определяемая отношением заряда Q одной из пластин конденсатора к напряжению между обкладками конденсатора:

$$C = \frac{q}{U}.$$

При неизменном расположении пластин электроемкость конденсатора является постоянной величиной при любом заряде на пластине. Единицей электроемкости является **фарад (Ф)**. 1 фарад — это емкость такого конденсатора, между пластинами которого возникает напряжение в 1 вольт при заряде на его пластинах в 1 кулон.

Емкость конденсатора, кроме того, зависит от вещества диэлектрика, заполняющего пространство между проводниками:



$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

где d — расстояние между пластинами, S — площадь пластин, ϵ_0 — электрическая постоянная, ϵ — диэлектрическая проницаемость вещества (диэлектрика).

При зарядке конденсатора возникает электрическое поле, при разрядке это поле исчезает. При этом при зарядке конденсатора совершаем работу мы, тогда как при разрядке работу совершает электрическое поле. Т.е. имеется выигрыш в работе, равный ее затрате на зарядку конденсатора. Следовательно, заряженный конденсатор обладает запасом потенциальной энергии, равным работе, затраченной на его зарядку. Потенциальная энергия W_p конденсатора емкостью C , заряженного до напряжения U , равна:

$$W_p = A = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}. \blacksquare$$

Если разность потенциалов между двумя точками не равна нулю, то в проводнике происходит перемещение зарядов. Подобное упорядоченное движение электрических зарядов носит название **электрического тока**. За направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов, хотя более правильным будет говорить о направлении, противоположном движению электронов. Связано это с тем, что во многих проводниках перемещаться способны только электроны.

Количественной характеристикой тока является его сила. **Силой тока I** в проводнике называется количество электричества Q , проходящее через сечение проводника за единицу времени t :

$$I = \frac{Q}{t}. \blacksquare$$

Единицей силы тока является ампер (А), названный так в честь французского физика Андре Мари Ампера (1775–1836).

1 Ампер — это такой ток, при котором за одну секунду через сечение проводника проходит заряд в один кулон.

Ток, величина и направление которого не меняется со временем, называют **постоянным током**.

В 1826 году немецким физиком Георгом Омом (1787–1854) было обнаружено, что отношение напряжения U между концами металлического проводника, являющегося участком электрической цепи, к силе тока I в цепи является постоянной величиной:

$$\frac{U}{I} = R = \text{const},$$

где R — величина, называемая **электрическим сопротивлением** проводника. Электрическое сопротивление проводника прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление вещества. Удельное сопротивление зависит от рода вещества и от температуры (с повышением температуры удельное сопротивление большинства металлов увеличивается). $\blacksquare$



Георге Ом (1787–1854).

Андре Мари Ампер (1775–1836).



Явление уменьшения удельного сопротивления до нуля при температуре, приближенной к абсолютному нулю, называется **сверхпроводимостью**. Материалы, обнаруживающие способность переходить при некоторых температурах, отличных от абсолютного нуля, в сверхпроводящее состояние, называются **сверхпроводниками**. Прохождение тока в сверхпроводнике происходит без потерь энергии, поэтому однажды возбужденный в сверхпроводящем кольце электрический ток может существовать неограниченно долго без изменения (рис. 37). ■

Рис. 37. При понижении температуры ртути до 4,1 К ее удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля.

Закон Ома для участка цепи. Сила тока I прямо пропорциональна напряжению U и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению R участка цепи:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Единицей электрического сопротивления является **ом** (Ом).

1 Ом — это сопротивление такого проводника, по которому течет ток в 1 ампер, если на концах его поддерживается напряжение в 1 вольт. Проводники в электрических цепях постоянного тока могут соединяться последовательно и параллельно. При параллельном соединении конец первого проводника соединяется с началом второго и т.д. При последовательном соединении сила тока одинакова во всех проводниках, а напряжение на концах всей цепи равно сумме падения напряжений на всех последовательно включенных проводниках:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

Таким образом, по закону Ома, полное сопротивление R участка цепи из последовательно включенных проводников будет:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

При параллельном соединении проводников их начала и концы имеют общие точки подключения к источнику тока. При этом напряжение U на всех проводниках одинаково, а сила тока I в неразветвленной цепи равна сумме сил токов во всех параллельно включенных проводниках (рис. 39):

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Сопротивление R будет равно:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

При прохождении электрического тока через цепь могут производиться различные действия — проводники могут нагреваться, в них могут происходить химические изменения, магнитная стрелка, поднесенная к проводнику, может перемещаться. Таким образом, электрический ток совершает работу. В случае с магнитной стрелкой ток совершает **механическую** работу. Работу сил электрического поля, создающего электрический ток, называют работой тока:

$$A = I^2 R \Delta t,$$

где I — сила тока, R — сопротивление тока, Δt — время, за которое совершается работа.

Мощность электрического тока равна отношению работы тока A ко времени Δt , за которое эта работа совершена:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = \frac{U^2}{R},$$

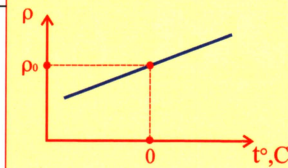


Рис. 36. Удельное сопротивление металлов при нагревании увеличивается примерно по линейному закону.

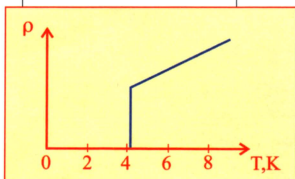
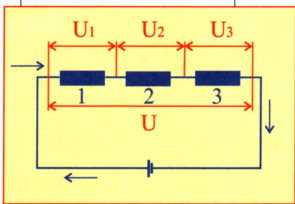


Рис. 38. Последовательное соединение проводников.



где U — напряжение тока в цепи, R — сопротивление тока.

В случае, когда электроток не совершает механической работы и в проводнике не происходят химические превращения, то работа электрического поля приводит только к нагреванию проводника. При этом работа электрического тока равна количеству теплоты, выделяемому проводником с током:

$$Q = I^2 R \Delta t.$$

Эта зависимость называется **закон Джоуля — Ленца**. ■

При нагревании тела происходит испускание им **электронов**. Это явление получило название **термоэлектронной эмиссии**. Для того чтобы вылететь из тела, преодолев силы притяжения со стороны положительных ионов, электроны должны обладать достаточной для этого кинетической энергией. Поэтому термоэлектронная эмиссия наблюдается при высоких температурах (например, у металлов — при температурах выше 100 K).

Явление термоэлектронной эмиссии получило широкое применение в технике, например в вакуумном диоде, электронно-лучевой трубке и т.д. Кроме металлов, являющихся проводниками, электрический ток способны проводить и растворы некоторых веществ. Вещества, растворы которых проводят электрический ток, называются **электролитами**. При прохождении электрического тока в них происходит изменение химического состава, заключающееся в разложении вещества на составные части. Процесс разложения вещества электрическим током носит название **электролиза**. Проводники, погруженные в раствор для подведения к нему тока, носят название **электродов**: положительный электрод — **анод** (от греческого «ана» — «вверх», «одос» — «путь»), а отрицательный — **катод** («ката» — «вниз»). Явление электролиза нашло широкое применение в современном промышленном производстве.

Электролитический способ дает возможность получать вещества с малым количеством примесей. Поэтому он используется в некоторых методах получения металлов — например, с его помощью из солей и оксидов получают медь, никель, алюминий и многие другие металлы, когда требуется высокая степень их химической чистоты.

Подбирая определенное напряжение на электродах электролитической ванны, можно добиться выделения на электродах необходимого металла. При этом посторонние примеси при электролизе переходят в раствор (и не выделяются на катоде) или выпадают на дно ванны в виде осадка (так называемый «анодный шлам»).

Получать чистые металлы можно не только из водных растворов. Чистые металлы можно получать из их расплавов, например промышленное получение алюминия из бокситов, содержащих окись алюминия. В этом процессе применяют очень большие токи, и, в соответствии с известным нам правилом Джоуля — Ленца, выделяемой теплоты хватает для поддержания вещества в расплавленном состоянии. Путем электролиза можно наносить тонкие слои металлов, например хрома, никеля, серебра, золота, на

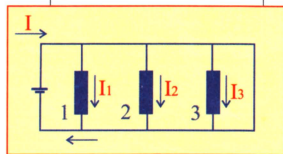
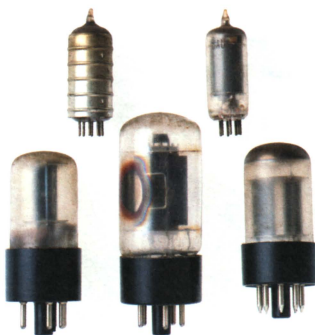


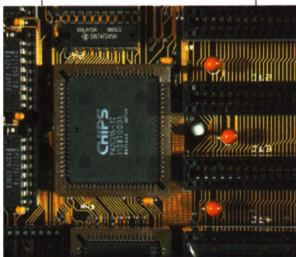
Рис. 39. Параллельное соединение проводников.

В радиолампах применяется явление термоэлектронной эмиссии.



В идеальном полупроводниковом кристалле электрический ток создается движением равного количества отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных дырок. Такой тип проводимости называется **собственной проводимостью полупроводника**. ■

Современные микросхемы состоят из миллионов и даже десятков миллионов полупроводниковых элементов.



поверхность изделий из других металлов. Этот способ называется **гальваностегией**. Нанесенные слои служат защитой изделия от окисления, повышают его прочность да и просто украшают изделие.

При более длительном пропускании тока через электролит можно получить на изделиях достаточно большой слой металла, который может быть отделен от изделия с сохранением его формы. Электролитическое получение точных копий различных изделий называется **гальванопластикой**. С помощью гальванопластики получают копии изделий сложной формы, например сложные технические элементы, копии скульптур и других произведений искусства.

Явление электролиза лежит также в основе принципа действия кислотных и щелочных аккумуляторов. ■

Закон электролиза (первый закон Фарадея). При прохождении электрического тока через электролит масса m вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду Δq , прошедшему через электролит:

$$m = k \Delta q = k I \Delta t,$$

где I — сила тока, Δt — время пропускания тока через электролит, k — коэффициент пропорциональности, называемый **электрохимическим эквивалентом вещества**.

Как уже упоминалось, многие вещества в кристаллическом состоянии не являются такими хорошими проводниками электрического тока, как металлы, но не могут быть отнесены и к диэлектрикам, так как не являются хорошими изоляторами. Эти вещества называются **полупроводниками**.

В отличие от металлов, при повышении температуры удельное сопротивление полупроводников уменьшается. Уменьшается удельное сопротивление полупроводниковых кристаллов и при освещении. Но самым привлекательным для технического применения свойством полупроводников является их способность к односторонней проводимости. Это свойство используется при создании разнообразных полупроводниковых приборов, служащих материальной базой современной радиоэлектроники, автоматики и вычислительной техники. ■

В полупроводнике электрический ток имеет двойственную природу: с одной стороны, он создается движением отрицательно заряженных электронов, с другой — перемещением положительных зарядов.

Свободные электроны под действием внешнего электрического поля могут перемещаться в полупроводнике, создавая **электронный ток проводимости**.

В полупроводниках свободных электронов мало. Все они «оторвались» с внешних оболочек атомов кристаллической решетки, что привело к превращению этих атомов в положительные ионы, окруженные нейтральными атомами.

Ион снова может нейтрализоваться, захватив электрон у одного из окружающих атомов (в среднем каждый освобожденный электрон остается свободным от 10^{-1} до 10^{-8} сек). В результате переходов электронов от нейтральных атомов к положительным ионам в полупроводнике происходит процесс перемещения места с недостающим электроном. Внешне этот процесс воспринимается как перемещение положительного электрического заряда, называемо-

го **дыркой**. При помещении полупроводника в электрическое поле возникает упорядоченное движение дырок. Появляется так называемый **дырочный ток проводимости**. ■

Свойства полупроводников сильно зависят от содержания примесей. Примеси бывают двух типов — донорные и акцепторные. Если в кристалле полупроводника имеется некоторое количество атомов примеси с большей валентностью, то эти атомы замещают в узлах кристаллической решетки атомы полупроводника. Таким примером является пятивалентный атом мышьяка, вступающий в ковалентные связи с четырьмя атомами кремния, а его пятый электрон оказывается незанятым в связях. Поскольку энергия, необходимая для разрыва связи пятого валентного электрона с атомом мышьяка в кристалле кремния, мала, то при комнатной температуре почти все атомы мышьяка лишаются одного из своих электронов и становятся положительными ионами.

Положительный ион мышьяка не может захватить электрон у одного из соседних атомов кремния, так как энергия связи электронов с атомами кремния значительно превышает энергию связи пятого валентного электрона с атомом мышьяка. Поэтому количество свободных электронов возрастает, а количество дырок остается прежним. Такие примеси, поставляющие электроны проводимости без возникновения такого же числа дырок, называются **донорными**. ■

В полупроводниковом кристалле, содержащем донорные примеси, электроны являются основными носителями тока. В то же время часть тока осуществляется дырками, поскольку небольшая часть собственных атомов полупроводникового кристалла ионизована. Полупроводниковые материалы, в которых электроны служат основными носителями заряда, а дырки — неосновными, называются **электронными полупроводниками** или полупроводниками **n-типа** (от слова «негативный» — отрицательный).

В кристалле полупроводника часть атомов может быть замещена атомами элемента с меньшей валентностью (например, атом полупроводника — кристалла германия — является четырехвалентным, а атом примеси — иридия — трехвалентным). В этом случае атомы иридия осуществляют связь только с тремя соседними атомами, а связь с четвертым атомом осуществляется лишь одним электроном. При этих условиях атом иридия захватывает электрон у одного из соседних атомов кремния и становится отрицательным ионом. Захват электрона от одного из атомов кремния приводит к возникновению дырки. Примеси, захватывающие электроны и создающие тем самым подвижные дырки, не увеличивая при этом число электронов проводимости, называют **акцепторными**.

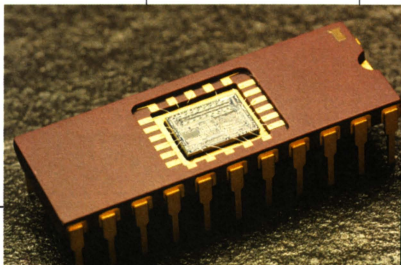
При низких температурах основными носителями тока в полупроводниковом кристалле с акцепторной примесью являются дырки, а неосновными — электроны. Полупроводники, в которых концентрация дырок превышает концентрацию электронов проводимости, называют **дырочными полупроводниками** или полупроводниками **p-типа** (от слова «положительный» — положительный).

Полупроводниковые материалы **n- и p-типа** широко используются при изготовлении полупроводнико-

Важной характеристикой элемента является его валентность. **Валентностью** называется свойство атомов данного элемента присоединять или замещать в соединении определенное число атомов другого элемента. За единицу валентности принята валентность атома водорода, которая во всех соединениях равна единице. Валентность элемента выражается только целым числом. ■

В основе теории **ковалентной связи** лежит представление об особой устойчивости атома, имеющего на внешнем электронном слое оболочку из восьми электронов. Особенность ковалентной связи состоит в том, что при ее возникновении атомы приобретают устойчивую конфигурацию не путем отдачи или присоединения электронов, а посредством образования одной или нескольких общих электронных пар. В создании электронной пары принимая участие оба атома, отдавая на ее образование по одному электрону. Эти электроны принадлежат наружным электронным слоям обоих атомов, дополняя число их электронов до восьми. ■

*Полупроводниковые материалы **n- и p-типа** используются в интегральных микросхемах.*



Рекомбинацией называется соединение при встрече положительного и отрицательного ионов и возникновение в результате нейтральных атомов. ■

Если к **p-n**-переходу приложено напряжение со знаком плюс на область с электронной проводимостью и со знаком минус на область с дырочной проводимостью, то электроны в **n**-полупроводнике и дырки в **p**-полупроводнике удаляются внешним полем от запирающего слоя в разные стороны, увеличивая его толщину. Сопротивление **p-n**-перехода велико, сила тока мала и практически не зависит от напряжения. Этот способ включения диода называется включением в **запирающем** или в **обратном** направлении. Обратный ток полупроводникового диода обусловлен наличием небольшой концентрации свободных электронов в **p**-полупроводнике и дырок в **n**-полупроводнике. ■

Если к **p-n**-переходу приложено напряжение со знаком плюс на область с дырочной проводимостью и со знаком минус на область с электронной проводимостью, то переходы основных носителей через **p-n**-переход облегчаются. Двигаясь навстречу друг другу, основные носители входят в запирающий слой, уменьшая его удельное сопротивление. Этот способ включения диода называется включением в **прямом** или в **прямом** направлении. ■

вых приборов. При этом принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на использовании свойств так называемого **p-n**-перехода.

Для создания **p-n**-перехода в кристалле с электронной проводимостью нужно создать область с дырочной проводимостью или в кристалле с дырочной проводимостью — область с электронной проводимостью.

Такая область создается введением примеси в процессе выращивания кристалла проводника или введением атомов примеси в готовый кристалл. Через границу, разделяющую области кристалла с различными типами проводимости, происходит диффузия электронов и дырок. ■

Диффузия электронов из **n**-полупроводника в **p**-полупроводник приводит к появлению в электронном проводнике нескомпенсированных положительных ионов донорной примеси, в дырочном полупроводнике рекомбинация электронов с дырками приводит к появлению нескомпенсированных зарядов отрицательных ионов акцепторной примеси. Между двумя слоями объемного заряда возникает электрическое поле. По мере накопления объемного заряда напряженность поля возрастает, и оно оказывает все большее противодействие переходам электронов из **n**-полупроводника в **p**-полупроводник или дырок из **p**-полупроводника в **n**-полупроводник. **Электронно-дырочный переход**, или **p-n**-переход, является границей, разделяющей области с дырочной (**p**) и электронной (**n**) проводимостями в одном монокристалле.

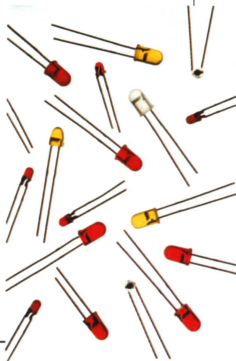
Пограничная область раздела полупроводников с различным типом проводимости в связи с уходом свободных электронов и дырок превращается в диэлектрик. Способность **p-n**-перехода пропускать ток в одном направлении и не пропускать его в противоположном направлении используется в приборах, называемых полупроводниковыми диодами, для преобразования переменного тока в постоянный (точнее, в пульсирующий) ток.

Уменьшение удельного сопротивления проводников при нагревании используется в специальных полупроводниковых приборах — **терморезисторах**. Их используют в приборах для измерения температуры, для поддержания постоянной температуры в автоматических устройствах — в закрытых камерах-термостатах.

Уменьшение удельного сопротивления полупроводника происходит и под действием освещения. Приборы, в которых используется свойство полупроводниковых кристаллов изменять свое электрическое сопротивление при освещении светом, называются **фоторезисторами**.

Помимо кулоновского поля в источниках тока (аккумуляторах, гальванических элементах, генераторах и пр.) создается и другое поле, называемое **сторонним**. **Сторонним** называется поле незлектростатического происхождения, работа которого по любой замкнутой цепи не равна нулю. Именно стороннее поле компенсирует энергетические потери в электрической цепи. Физическая величина, равная отношению работы стороннего поля по перемещению заряда к величине этого заряда, называется **электродвижущей силой** (ЭДС):

Светодиоды являются еще одним примером полупроводников.



$$E_{\text{зас}} = \frac{A_{\text{ст}}}{\Delta q},$$

где q — переносимый заряд. ■

Закон Ома для полной цепи. Сила тока в электрической цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе E источника тока и обратно пропорциональна сумме электрических сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи:

$$I = \frac{E_{\text{зас}}}{R + r}.$$

Прохождение электрического тока возможно и в газообразном состоянии вещества, но при определенных условиях. Обычно вещество в газообразном состоянии является изолятором, так как атомы или молекулы, из которых оно состоит, содержат одинаковое число отрицательных и положительных электрических зарядов и в целом нейтральны. Поэтому для прохождения электрического тока через газ необходимо какое-либо внешнее воздействие. Подобное явление называется **несамостоятельным электрическим разрядом**. ■

Внешним воздействием может послужить **нагревание газа**, делающее его проводником, потому что часть атомов или молекул газа превращается в заряженные ионы. Процесс возникновения свободных электронов и положительных ионов в результате столкновений атомов и молекул газа при нагревании называется **термической ионизацией**. Ионизация атомов или молекул может происходить и под действием света. В таком случае она называется **фотоионизацией**.

Возникновение электрического тока в газе возможно и без воздействия внешних ионизаторов. Подобное явление называется **самостоятельным электрическим разрядом**.

Существует несколько видов самостоятельного электрического разряда. ■

Искровой разряд происходит в течение короткого времени в результате значительного уменьшения напряжения. При искровом разряде

Ионизацией атома называется процесс отрыва электрона от атома. Минимальная энергия, которую необходимо затратить для осуществления этого процесса, называется **энергией связи**.

Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизована, называется **плазмой**. Иногда плазму называют четвертым агрегатным состоянием вещества. ■

Существует несколько разновидностей молний.

Линейная молния — искровой разряд с разветвлениями длиной в среднем 2–3 км (иногда до 20 км), диаметр нити молнии достигает нескольких десятков сантиметров.

Ракетная молния имеет световой канал, который продвигается вперед подобно ракете.

Четочная молния представляет собой разряд в виде цепочки светящихся точек (четок). Встречается редко.

Ленточная молния представляет собой разряд, который как бы смещается по ее каналу зигзагообразной формы.

Шаровая молния — ярко светящийся электрический разряд различной окраски и величины. У земной поверхности обычно это шар диаметром около 10 см, иногда грушевидной формы.

Огни святого Эльма — тихие электрические разряды в виде светящихся пучков на остриях предметов при очень большой напряженности электрического поля атмосферы — порядка 100000 В/м. ■

Молния является типичным примером искрового разряда.



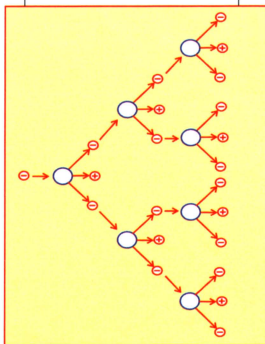


Рис. 40. Механизм развития ионной лавины.

В сварочных аппаратах применяется явление дугового разряда.

газ внезапно скачкообразно утрачивает свои изолирующие свойства и становится хорошим проводником. Типичным примером искрового разряда является молния.

При искровом разряде причина ионизации газа заключается в разрушении атомов и молекул при столкновениях с ионами (**ударная ионизация**).

Ударная ионизация может возникнуть при достаточно большой напряженности поля (так называемое **напряжение пробоя**), когда кинетической энергии иона может оказаться достаточно для того, чтобы ионизировать нейтральную молекулу при столкновении. В результате образуется отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный ион.

Возникшие в процессе ударной ионизации электроны и ионы увеличивают число зарядов в газе, которые приходят в движение под действием электрического поля и способны произвести ударную ионизацию новых атомов. Таким образом, процесс усиливает сам себя, и ионизация в газе достигает очень большой величины. Этот процесс называется, по аналогии, **ионной лавиной** (рис. 40). ■

Тлеющий разряд бывает при понижении давления газа в разрядном промежутке, вследствие чего разрядный канал становится более широким, и плазма равномерно заполняет всю разрядную трубку (рис. 41).

Выделяют две основные части тлеющего разряда: несветящуюся часть, прилегающую к катоду, получившую название **темного катодного пространства**, и светящийся столб газа, распространяющийся до самого анода, называемый **положительным столбом**. Причиной ионизации газа в тлеющем разряде являются ударная ионизация и выбивание электронов с катода положительными ионами. ■

Дуговой разрядом называется длительный самостоятельный электрический разряд в газах, поддерживающийся за счет термоэлектронной эмиссии с катода. ■

Коронный разряд возникает в том случае, когда ионизация электронным ударом (ударная ионизация) происходит лишь вблизи одного из электродов, в области с высокой напряженностью электрического поля. ■

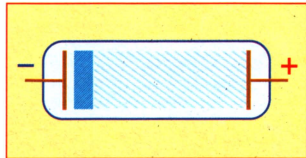


Рис. 41. Тлеющий разряд.



МАГНЕТИЗМ

Первым научным исследованием магнитных явлений явилась книга английского ученого Уильяма Гильберта «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле», вышедшая в 1600 году. В ней автор описал уже известные свойства магнита, а также собственные открытия. Одним из свойств магнита Гильберт называл то, что одинаковые полюсы отталкиваются, а разноименные притягиваются. Кроме того, он описал явление магнитной индукции, способы намагничивания железа и стали и т.д.

В 1820 году датским физиком Хансом Эрстедом (1777–1851) была доказана связь электричества и магнетизма. Эрстед установил, что если над проводником, направленным вдоль земного меридиана, поместить магнитную стрелку, которая показывает на север, и по проводнику пропустить электрический ток, то стрелка отклоняется на некоторый угол.

Новый важнейший шаг в исследовании электромагнетизма был сделан в том же году французским ученым Андре Мари Ампером (1775–1836). Он установил, что два прямолинейных проводника с током, расположенные параллельно друг другу, притягиваются, если токи в них имеют одинаковое направление, и отталкиваются, если направление токов противоположно. Явление взаимодействия электрических токов Ампер назвал **электродинамическим взаимодействием**. ■

Опыты Эрстеда и Ампера показали, что источниками магнитных полей являются движущиеся заряды (токи). Из всех известных действий тока только магнитное взаимодействие сопровождается электрический ток при любых условиях, в любой среде и в вакууме.

Магнитное взаимодействие проводников с током используется для определения единицы силы тока — **ампера (А)**. Ампер — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, вызывал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Благодаря компасу и наличию у Земли магнитного поля у человека появилась возможность ориентироваться в безбрежных морских просторах.



Магнитное поле — составная часть электромагнитного, действующая только на движущиеся заряды. ■



Ханс Эрстед (1777–1851).

Рис. 42. Магнитные поля.



Для того чтобы запомнить связь между направлением тока и направлением поля, им создаваемого, можно использовать так называемое **правило буравчика**.

Если ввинчивать буравчик так, чтобы он шел по направлению тока, то направление вращения его ручки указывает направление поля (направление силовых линий).

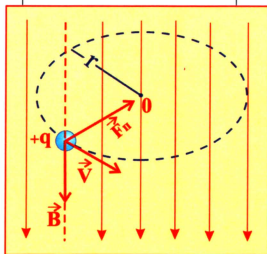
Либо:

Если ввинчивать буравчик так, чтобы он шел по направлению поля (вдоль силовой линии), то направление вращения его ручки укажет направление тока (рис. 43). ■

Направление векторов сил Ампера и Лоренца определяется правилом левой руки.

Правило левой руки: если положить левую ладонь так, чтобы вытянутые пальцы указывали направление тока, а линии магнитного поля отвесно входили в ладонь, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник. ■

Рис. 44. Движение заряженной частицы в магнитном поле.



Для характеристики способности магнитного поля оказывать силовое действие на проводник с током вводится векторная величина — **магнитная индукция**:

$$B = \frac{F}{Il}$$

где F — сила Ампера, действующая на проводник с током, I — сила тока в проводнике, l — длина проводника.

Единица индукции определяется как индукция такого магнитного поля, в котором на 1 м проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н. Эта единица называется **тесла** (Тл) — в честь выдающегося югославского электротехника Николы Тесла (1856–1943).

Наглядную картину магнитного поля можно получить, используя понятие силовых линий. **Силовыми линиями** магнитного поля называются линии, проведенные так, что касательные к ним в каждой точке указывают направление поля в этой точке.

Главное отличие магнитного поля от электростатического заключается в том, что силовые линии магнитного поля всегда замкнуты.

Сила, с которой магнитное поле действует на прямолинейный проводник длиной l , по которому течет ток I , называется **силой Ампера** и находится по формуле:

$$F = IBl \sin \alpha,$$

где α — угол между направлениями тока и вектором магнитной индукции B .

Действие магнитного поля на проводник с током означает, что магнитное поле действует на движущиеся электрические заряды. Сила, с которой магнитное поле действует на движущийся со скоростью v заряд q , называется **силой Лоренца** и определяется по формуле:

$$F_L = qvB \sin \alpha,$$

где α — угол между направлениями скорости и вектором магнитной индукции B .

В однородном магнитном поле на заряженную частицу, движущуюся со скоростью v перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, действует сила F_L , постоянная по модулю и направленная перпендикулярно вектору скорости. В вакууме под действием силы Лоренца частица приобретает центростремительное ускорение, определяемое по формуле:

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{qBv}{m},$$

где m — масса частицы, B — вектор магнитной индукции, q — заряд, и движется по окружности. Радиус r окружности, по которой движется частица, определяется по формуле:

$$r = \frac{mv}{qB}.$$

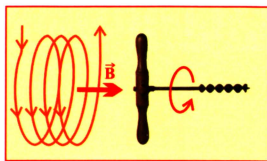


Рис. 43. Правило буравчика.

Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}.$$

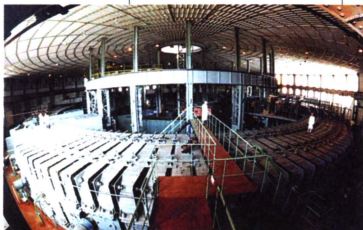
Как видно из формулы, период обращения частицы в однородном магнитном поле при постоянной массе не зависит от скорости v и радиуса r траектории ее движения. Это свойство широко используется в ускорителях заряженных частиц, например в циклотроне. В естественных условиях проводник с током располагается в определенной среде. Множество экспериментов свидетельствуют о том, что магнитное поле в таком случае создается не только этим током, но и движением заряженных частиц внутри атомов и молекул вещества (так называемые **молекулярные токи**).

Впервые гипотеза о наличии молекулярных токов была высказана Ампером. Он утверждал, что магнитные взаимодействия во всех случаях являются взаимодействиями токов.

При отсутствии внешнего магнитного поля создаваемые молекулярными токами поля скомпенсированы из-за хаотического движения атомов. Однако при возникновении внешнего магнитного поля эта компенсация нарушается, и поле молекулярных токов изменяет индукцию магнитного поля в веществе, т.е. происходит **намагничивание** вещества. ■

Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция B магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции B_0 магнитного поля в вакууме, называется **магнитной проницаемостью**:

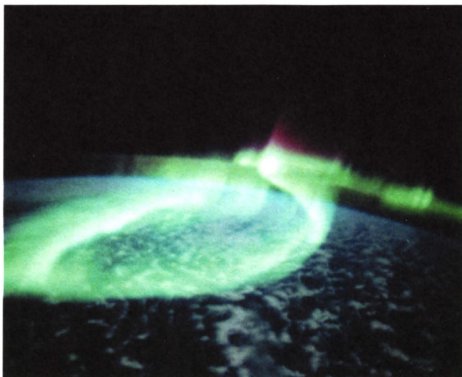
$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$



Ускоритель заряженных частиц.

Результатом действия силы Лоренца является одно из красивейших природных явлений — полярное сияние. Оно представляет собой свечение разреженных газов земной атмосферы, вызванное мощнейшим потоком электронов, выбрасываемых Солнцем. Приближаясь к Земле, заряженные частицы попадают в магнитное поле Земли. Здесь на них действует сила Лоренца, отклоняющая их от первоначального прямого пути в направлении полярных областей земного шара. ■

Полярное сияние можно без колебаний назвать восьмым чудом света...



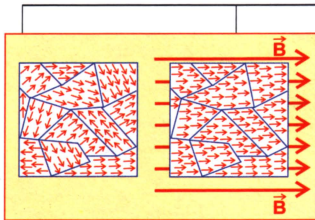


Рис. 45. При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле происходит упорядочение ориентации магнитных полей отдельных доменов.

Упорядоченность ориентации доменов в ферромагнетике может быть нарушена тепловыми колебаниями атомов в кристалле. Чем выше температура кристалла, тем быстрее разрушается порядок в ориентации доменов и происходит размагничивание вещества. Температура, выше которой вещество перестает быть ферромагнетиком, называется температурой Кюри. Температура Кюри, например у железа -770°C , у никеля -356°C . ■

Индукционным называется электрический ток, возникающий в замкнутом контуре при изменении магнитного поля.

Электромагнитной индукцией называется явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного поля, пронизывающего контур. ■

Эта величина характеризует магнитные свойства вещества и зависит от рода вещества и его состояния.

В зависимости от значения магнитной проницаемости вещества делят на ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики. ■

Ферромагнетики обладают сильными магнитными свойствами — способны значительно усиливать внешнее магнитное поле (μ значительно больше 1, может достигать тысяч единиц). При этом:

- магнитная проницаемость зависит от индукции внешнего поля;
- способность намагничиваться падает с увеличением температуры и при определенном ее значении (так называемая температура Кюри) исчезает полностью;
- при выключении внешнего поля ферромагнетик остается намагниченным. ■

Парамагнетики называются вещества, которые создают слабое магнитное поле, по направлению совпадающее с внешним магнитным полем. ■

Диамагнетики называются вещества, которые создают поле, ослабляющее внешнее магнитное поле.

Основным отличием ферромагнетиков является то, что ферромагнитные свойства связаны с кристаллической структурой вещества, а не со свойствами отдельных атомов и молекул, как это имеет место в случае с диамагнетиками и парамагнетиками.

Ферромагнитные свойства вещества определяются, как уже было сказано, не магнитными свойствами отдельных атомов и молекул, а намагничиванием целых областей, называемых **доменами** — небольших участков вещества (протяженностью $10^{-2} - 10^{-4}$ см), содержащих очень большое количество атомов. Взаимодействие магнитных моментов отдельных атомов ферромагнетика приводит к возникновению сильных внутренних магнитных полей, действующих в пределах каждой такой области и вызывающих параллельную ориентацию собственных магнитных полей электронов в этой области. В отдельных доменах магнитные поля имеют различные направления и в большом кристалле взаимно компенсируют друг друга. При внесении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле происходит упорядочение ориентации магнитных полей отдельных доменов. С увеличением магнитной индукции B внешнего поля возрастает степень упорядоченности ориентации отдельных доменов — магнитная индукция B возрастает. При некотором значении индукции внешнего поля наступает полное упорядочение ориентации доменов, и возрастание магнитной индукции прекращается. Это явление называется **магнитным насыщением**.

При прекращении действия из внешнего магнитного поля значительная часть доменов сохраняет упорядоченную ориентацию — ферромагнетик становится **постоянным магнитом**. Для изготовления постоянных магнитов используются сталь, сплавы железа с алюминием, никелем и кобальтом, оксиды железа и некоторых других металлов. ■

Важным шагом в развитии электродинамики после опытов Ампера было открытие явления электромагнитной индукции. Это

явление было открыто в 1831 году английским физиком Майклом Фарадеем (1791–1867).

Во-первых, Фарадей обнаружил явление электромагнитной индукции для случая, когда катушки намотаны на один и тот же барабан. Если в одной катушке возникает или пропадает электрический ток в результате подключения к ней или отключения от нее гальванической батареи, то в другой катушке в этот момент возникает кратковременный ток. Этот ток обнаруживается гальванометром, который присоединен ко второй катушке.

Затем Фарадей установил также наличие индукционного тока в катушке, когда к ней приближали или удаляли от нее катушку, в которой протекал электрический ток.

Третий случай электромагнитной индукции, который обнаружил Фарадей, заключался в том, что в катушке появлялся ток, когда в нее вносили или же удаляли из нее магнит.

Явление электромагнитной индукции свидетельствует о действии в контуре сторонних сил неэлектростатической природы и о возникновении ЭДС индукции. Количественное описание явления электромагнитной индукции дается на основе установления связи между ЭДС индукции и физической величиной, называемой магнитным потоком.

Потоком магнитной индукции Φ через поверхность площадью S называют величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции B на площадь S и на косинус угла α между вектором B и нормалью к поверхности:

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

Единицей магнитного потока в Международной системе единиц является **вебер (Вб)**. Магнитный поток через площадь, ограниченную замкнутым контуром, равен Γ Вб, если при равномерном убывании этого потока до нуля за Γ с в контуре возникает ЭДС индукции Γ В. ■

Закон электромагнитной индукции Фарадея. ЭДС индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения пронизывающего его магнитного потока Φ , взятой с обратным знаком:

$$E_{\text{экс}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Направление индукционного тока в контуре зависит от того, возрастает или убывает магнитный поток, пронизывающий контур, а также от направления вектора индукции магнитного поля относительно контура. Общее правило, позволяющее определить направление индукционного тока в контуре в разных случаях электромагнитной индукции, было установлено в 1833 году петербургским академиком Эмилием Христиановичем Ленцем (1804–1865). ■

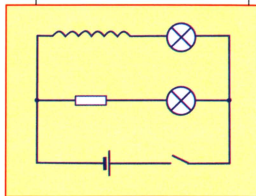
Правило Ленца. Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через площадь, ограниченную контуром, стремится компенсировать то изменение магнитного потока, которым вызывается данный ток.

Магнитный поток Φ пропорционален модулю индукции B магнитного поля внутри контура, которая, в свою очередь, пропорциональна силе тока I в проводнике. Отсюда следует, что магнитный поток через контур прямо пропорционален силе тока в контуре:



Майкл Фарадей (1791–1867).

Рис. 46. Явление самоиндукции можно наблюдать, собрав электрическую цепь из катушки с большой индуктивностью, резистора (с таким же электрическим сопротивлением, как и у провода катушки), двух одинаковых ламп накаливания и источника тока.





Эмилий Христианович Ленц
(1804–1865).

Явление электромагнитной индукции применяется при магнитной записи информации, например звуковой, при помощи электродинамического микрофона. В микрофоне имеется тонкая и гибкая мембрана, к которой приклеена легкая проволоочная катушка, расположенная в кольцевом зазоре между полюсами постоянного магнита. При прохождении звуковой волны возникают колебания давления воздуха, вызывающие колебания мембраны и, соответственно, проволоочной катушки. Колебания катушки в магнитном поле постоянного магнита приводят к возникновению переменной ЭДС индукции — таким образом звуковые колебания превращаются в электрические. ■

$$\Phi = LI,$$

где L — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом самоиндукции или **индуктивностью**.

Индуктивность определяется размерами и формой проводника, магнитной проницаемостью среды. За единицу индуктивности принимается **генри** (Гн). Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А магнитный поток через контур равен 1 Вб.

При любом изменении магнитного поля в окружающем пространстве возникает электрическое поле. Это электрическое поле приводит в движение свободные электрические заряды в контуре, создавая индукционный электрический ток. Электрическое поле, возникающее при изменениях магнитного поля, называют **вихревым электрическим полем**. Вихревое электрическое поле отличается от электростатического поля тем, что оно не связано с электрическими зарядами, его линии напряженности представляют собой замкнутые линии. Работа сил вихревого электрического поля при движении электрического заряда по замкнутой линии может быть отлична от нуля.

Работа сил вихревого электрического поля по перемещению электрических зарядов и является работой сторонних сил, источником ЭДС индукции.

Возникновение вихревого электрического поля и ЭДС индукции в проводнике, по которому течет переменный ток, называется самоиндукцией (рис. 46). ■

По правилу Ленца, возникающее при самоиндукции электрическое поле препятствует изменению силы тока в проводнике. Если сила тока в проводнике будет падать или возрастать, то вихревое электрическое поле будет препятствовать этому, поддерживая силу тока на прежнем уровне. В результате, при замыкании цепи определенное значение силы тока устанавливается постепенно, а при размыкании ток прекращается не сразу. Самоиндукция подчиняется закону электромагнитной индукции — ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в катушке:

$$E_{\text{эс}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Явлением **взаимной индукции** называется наведение ЭДС индукции в одном проводнике под действием магнитного поля другого проводника, в котором течет переменный ток. Это явление используется в трансформаторах для повышения или понижения напряжения переменного тока. ■

Необходимо упомянуть, что индуцированные токи могут возникнуть при изменении магнитного потока не только в проволоочных проводниках, но и в сплошных кусках металла. Эти токи называют вихревыми токами либо токами Фуко, по имени французского физика Леона Фуко (1819–1868), впервые их открывшего. Направление и величина этих токов зависят от формы куска металла, от направления магнитного потока, от свойств самого металла и от скорости изменения магнитного потока. ■

В микрофоне применяется явление электромагнитной индукции.



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Каждую секунду происходят изменения в окружающем нас мире — движется энергия, переходя из одного вида в другой, течет время, различные объекты изменяют свое положение в пространстве и т.д. Но если мы внимательно присмотримся к этим изменениям, то заметим, что некоторые из процессов повторяются с определенной периодичностью и представляют собой многократное повторение одного и того же цикла движений. Повторение циклов может быть совершенно одинаковым (движение маятника) либо достаточно сильно отличаться друг от друга (приливы и отливы, покачивание ветвей, смена времен года).

В физике всякий периодический, или почти периодический, процесс, в котором какая-либо физическая величина принимает одинаковые значения через равные или почти равные промежутки времени, называется колебательным движением или колебанием.

Мы рассмотрим два основных вида колебаний — механические и электромагнитные. ■

Механическими колебаниями называют движения тел, повторяющиеся точно или приблизительно через одинаковые промежутки времени.

Очень часто встречаются такие объекты, которые в результате однократного кратковременного внешнего воздействия способны в течение относительно длительного периода времени совершать колебательные движения (например, качели, маятник, груз на пружине и т.д.). Такого рода колебания называются **свободными**. Они возникают под действием внутренних сил (например, сил упругости и силы тяжести, как это происходит в случае с грузом на пружине). Если же колебания совершаются под действием внешних сил, то их называют **вынужденными**. Примером вынужденных колебаний является движение поршня в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

Свободные механические колебания возникают при выполнении двух условий. ■

Во-первых, силы, действующие на тело, или хотя бы одна из них, должны зависеть от ко-

Периодическим называется повторяющееся движение, у которого каждый цикл в точности воспроизводит любой другой цикл. ■

Движения качелей является ярким примером механических колебаний.



ординат. В одном определенном положении тела в пространстве, называемом положением равновесия, равнодействующая всех сил, действующих на тело, должна быть равна нулю. При выведении тела из положения равновесия равнодействующая всех сил должна быть отлична от нуля и направлена к положению равновесия. ■

Во-вторых, силы трения в колебательной системе должны быть достаточно малы.

Существует несколько основных величин, характеризующих механические колебания:

— Смещение тела от положения равновесия. Мгновенное перемещение тела относительно положения равновесия называется **отклонением** или **смещением** x .

— Максимальное отклонение тела от положения равновесия называется **амплитудой** колебаний. Величина амплитуды определяется тем первоначальным отклонением или толчком, которым тело было приведено в движение.

— Общим признаком механических колебаний как физического процесса является повторяемость процесса движения через определенный промежуток времени. Длительность одного полного колебания называется **периодом колебания** T и выражается в секундах.

— Частота колебаний. Физическая величина, обратная периоду колебаний, определяющая число колебаний в секунду, называется **частотой колебаний**:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Единица частоты — **герц** (Гц).

В физике часто используется понятие **циклической частоты** ω , определяющей число колебаний, происходящих за 2π секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

— Время t , отсчитываемое от момента начала колебания.

— **Фаза** Φ характеризует мгновенное состояние колебательной системы и определяется отклонением и временем:

$$\Phi = \omega t + \Phi_0,$$

где Φ_0 — фаза колебаний в начальный момент времени ($t = 0$), называемая **начальной фазой**. Фаза отражает сдвиг по времени между двумя колебаниями. Если колебания происходят без запаздывания, то их называют **син-фазными**. При запаздывании одного из колебаний на полпериода говорят, что колебания находятся в **противофазе**.

Фазой гармонического колебания называется угол, соответствующий времени, протекшему от какого-нибудь произвольно выбранного момента. То есть в данном случае речь идет не о разности фаз двух колебаний, а о фазе одного колебания.

Важнейшим видом колебательных движений является **гармоническое колебание**, которое описывается уравнением:

$$x = x_m \cos(\omega t + \Phi_0),$$

где x — смещение тела от положения равновесия, ω — циклическая частота колебаний, t — время.

Типичным примером механических колебаний является движение метронома.



В процессе колебания происходит превращение кинетической энергии в потенциальную. Процесс перехода энергии из одного вида в другой является периодическим. В моменты максимального смещения кинетическая энергия равна нулю, и полная энергия соответствует наибольшему значению потенциальной энергии. При прохождении телом положения равновесия кинетическая энергия достигает своего максимального значения, а потенциальная равна нулю, т.е. полная энергия состоит только из кинетической энергии. Любую колебательную систему можно свести к совокупности простых колебательных систем. В физике принято рассматривать четыре вида простых колебательных систем: математический маятник, физический маятник, крутильный маятник и линейные колебания пружины (упругие колебания). ■

Физическим маятником называются колебательные системы, представляющие собой физические тела различной формы и размеров, совершающие колебания около точки подвеса или опоры, при этом центр тяжести располагается ниже точки подвеса. Примером физического маятника может послужить груз на веревке, маятник настенных часов, весы и тому подобное. ■

Математическим маятником называют тело небольших размеров, подвешенное на нерастяжимой нити, масса которой пренебрежимо мала по сравнению с массой тела. При вертикальном положении нити действие силы тяжести уравнивается действием силы упругости. Это положение является положением равновесия.

При малых отклонениях маятника от положения равновесия возникает равнодействующая сил тяжести и упругости, направленная к положению равновесия (рис. 47), и его колебания являются гармоническими. Период колебаний математического маятника не зависит от массы груза и от амплитуды колебаний и равен:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

где l — длина маятника.

При **линейных колебаниях пружины (упругих колебаниях)** причиной возникновения гармонических колебаний является действие сил упругости.

В отличие от других видов колебательных систем, при упругих колебаниях потенциальная энергия по своей природе является энергией деформации упругого тела. Период упругих колебаний пропорционален квадратному корню из массы тела, причем увеличение массы упругой колебательной системы влечет за собой замедление колебаний, увеличение их периода. Кроме того, период упругих колебаний связан с жесткостью пружины — чем больше жесткость (т.е. чем меньше упругость системы), тем меньше период колебаний. Таким образом, существует связь между циклической частотой ω , жесткостью k деформируемого тела и массой m тела:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Примером упругих колебаний являются колебания груза на пружине (рис. 48), колебания струны. ■

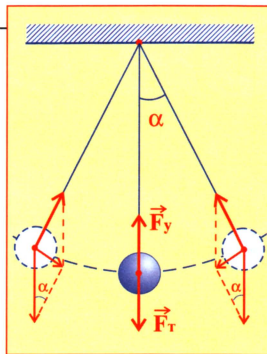
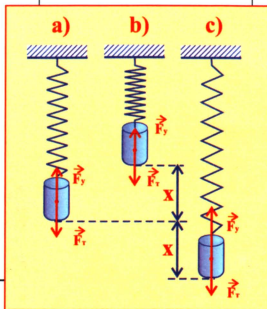


Рис. 47. При малых отклонениях маятника от положения равновесия возникает равнодействующая сил тяжести и упругости, направленная к положению равновесия.

Рис. 48. Условия возникновения свободных колебаний: а) сила тяжести и сила упругости равны по модулю, и груз находится в покое, б) из-за уменьшения деформации пружины сила упругости убывает, сила тяжести остается постоянной, равнодействующая направлена вниз, в) из-за увеличения деформации пружины сила упругости возрастает, а сила тяжести остается неизменной, равнодействующая направлена вверх.



Крутильным маятником называется твердое тело, подвешенное на вертикальном невесомом упругом стержне, которое может колебаться при кручении его вокруг оси, проходящей через стержень. Причиной крутильных колебаний являются упругие силы, возникающие в стержне при малых поворотах тела. Крутильные маятники применяются в наручных часах (колесико, к оси которого прикреплена стальная пружина — так называемый балансир). Поскольку крутильные колебания относятся к упругим колебаниям, то для их периода действуют те же закономерности, что и для периода линейных колебаний пружины, приведенные выше. Какой бы маятник мы ни использовали, спустя некоторое время обнаруживается, что колебания прекращаются. Связано это с тем, что в любой колебательной системе действуют силы трения, сопротивление воздуха и т.п., которые тормозят движение. Механическая энергия движения постепенно превращается во внутреннюю энергию теплового движения атомов и молекул. Явление уменьшения амплитуды колебаний, приводящее к прекращению колебаний, называется **затуханием колебаний**.

Как уже упоминалось, вынужденные колебания, в отличие от свободных, возникают под действием внешней силы и характеризуются следующими свойствами:

- в колебательной системе, на которую действует периодически меняющаяся сила, устанавливается периодическое движение;
- период вынужденных колебаний равен периоду действующей силы.

Вынужденные колебания, как правило, являются **незатухающими** (рис. 49), так как действие сил трения компенсируется постоянным внешним воздействием. Незатухающие свободные колебания, которые происходили бы в колебательной системе при условии отсутствия трения, называются **собственными колебаниями** системы.

При вынужденных колебаниях иногда происходит совпадение периода собственного колебания системы с периодом внешней силы, в результате чего амплитуда достигает максимального значения. Подобное явление называется **резонансом**. При резонансе внешняя сила совершает за период максимальную положительную работу над колебательной системой, поэтому условие резонанса можно определить как условие максимальной передачи энергии колебательной системе.

Незатухающими являются **автоколебания**, т.е. такие колебания, которые поддерживаются внутренними источниками энергии при отсутствии воздействия внешней переменной силы. Частота и амплитуда автоколебаний определяются свойствами самой колебательной системы, и амплитуда не

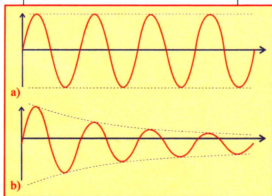


Рис. 49. Периодические колебания: а) незатухающие и б) затухающие.

Кажущийся таким мощным мост оказывается совершенно беззащитным перед ротой марширующих солдат.



зависит от времени и от начального воздействия, вызвавшего колебания. Автоколебательная система состоит из трех основных элементов: колебательной системы, источника энергии, устройства с обратной связью, регулирующего поступление энергии из источника в колебательную систему. В технике широко распространены электромеханические и механические автоколебательные системы (например, настенные часы с маятником). ■

Теорема Фурье. Всякое периодическое колебание периода T может быть представлено в виде суммы гармонических колебаний с периодами, равными T , $T/2$, $T/3$, $T/4$ и т.д., т.е. с частотами n (при $n = 1/T$), $2n$, $3n$, $4n$ и т.д.

Самая низкая частота n называется **основной частотой**. Колебание с основной частотой n называется **первой гармоникой**, или **основным тоном**, а колебания с частотами $2n$, $3n$, $4n$ и т.д. называются **высшими гармониками** или **обертонами**.

Любое колебательное движение происходит в определенной среде — твердой, жидкой или газообразной, состоящей из отдельных частиц, взаимодействующих между собой силами связи. При возбуждении колебаний частиц среды в одном месте происходит постепенная передача колебаний в другие места, удаленные от начального. Передача колебаний может быть вызвана силами упругости, возникающими вследствие деформации среды при ее колебаниях. Процесс распространения колебаний в пространстве называется **волной**.

Мы видим волны на поверхности воды, при помощи звуковых волн слышим друг друга, ощущаем воздействие ударной волны от взрыва, наблюдаем сейсмические волны — колебания земной коры. Все эти волны — механические.

Механические волны распространяются с определенной скоростью. Например, мы слышим раскаты грома лишь спустя какое-то время после вспышки молнии.

Скорость распространения колебаний в пространстве называется **скоростью волны v** .

Расстояние между ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах, называется **длиной волны**:

$$\lambda = vT,$$

где λ — длина волны, T — период колебаний.

При этом скорость волны оказывается связанной с частотой колебаний v следующим уравнением:

$$v = \lambda \nu.$$

Частота волн определяется частотой колебаний источника волн, скорость же зависит от свойств среды. Поэтому волны одной и той же частоты в разных средах имеют разную длину.

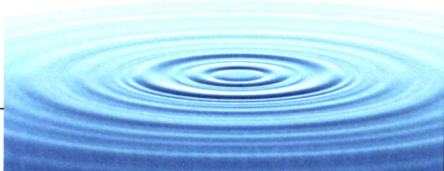
Свойства механических волн зависят от многих факторов: от вида связи между смежными участками среды, от размеров среды, от формы тела и других. Существуют два вида упругих волн — продольные и поперечные. ■

Поперечными называются **волны**, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению распространения. Поперечные волны распространяют-

Явление резонанса может быть причиной разрушения машин, зданий, мостов и других сооружений, если собственные частоты их колебаний совпадут с частотой периодически действующей силы. Поэтому, например, двигатели в автомобилях устанавливают на специальных амортизаторах, а воинским подразделениям при движении по мосту запрещается идти «в ногу».

Но резонансные явления способны приносить не только вред, но и пользу — например, в акустике и радиотехнике. ■

Круги на воде — один из примеров механических волн.





Благодаря звуковым волнам мы имеем возможность слышать окружающий нас мир во всем многообразии его звуковой палитры.

Достигая скорости звука, самолет преодолевает звуковой барьер.



ся в твердых телах, в которых возникают силы упругости при деформации сдвига или под действием сил поверхностного натяжения и силы тяжести. Для поперечных волн верно правило: скорость распространения упругих волн прямо пропорциональна жесткости тела и обратно пропорциональна его плотности.

Волны, в которых колебания происходят вдоль направления распространения волны, называются **продольными**. Продольные волны могут возникать в газах, жидкостях и твердых телах. Одной из основных разновидностей продольной волны являются звуковые волны.

Изучением звуковых явлений занимается **акустика** (учение о звуке). Механические колебания с частотами от 17–20 Гц до 20000 Гц называются звуковыми, или акустическими. Колебания с частотами ниже звукового диапазона называются **инфразвуковыми**, а с частотами выше звукового диапазона — **ультразвуковыми**.

Одной из основных величин в акустике является скорость распространения звука. В первых опытах по измерению скорости звука в воздухе, проведенных еще в XVII веке, измерялось время t между моментом наблюдения световой вспышки и моментом прихода звука при пушечном выстреле. Тогда считалось, что скорость света — бесконечно большая величина, т.е. свет распространяется мгновенно. И скорость звука определялась по известной нам из механики формуле:

$$v = \frac{s}{t},$$

где s — расстояние от пушки до наблюдателя, а t — разность времени между появлением вспышки и приходом звука выстрела.

Современное измерение скорости звука в воздухе при нормальных условиях дает величину, равную 331 м/с. Интересный эффект наблюдается при достижении движущимся телом скорости звука, когда тело (например, самолет) «догоняет» фронт волны. Этот эффект называется сверхзвуковым барьером. Нередко, наблюдая полет сверхзвукового истребителя, можно услышать громкий хлопок, который возникает при прохождении самолетом слоя плотного воздуха — фронта создаваемой им звуковой волны.

При своих колебаниях звучащее тело попеременно то сжимает слой среды, прилегающий к телу, то создает разрежение в этом слое.

В **газе** процесс распространения сжатия или разрежения происходит в результате столкновений молекул газа, поэтому скорость распространения звука в газе примерно равна скорости теплового движения молекул. Средняя скорость теплового движения молекул уменьшается с понижением температуры газа, поэтому уменьшается с понижением температуры газа и скорость распространения звука. Например, в водороде при понижении температуры от 300 до 17 К скорость звука уменьшается от 1300 до 320 м/с.

Связь между атомами и молекулами в **жидкостях и твердых телах** значительно более жесткая, чем в газах. Поэтому скорость распространения звуковых волн в жидкостях и твердых телах значительно больше скорости звука в газах. Например, скорость звука в воде равна 1500 м/с, а в стали — 6000 м/с.

При прохождении звуковой волны в газе или жидкости возникает дополнительное давление, называемое **звуковым давлением**. Нижняя граница ощущения звука человеком соответствует звуковому давлению $\approx 10^{-5}$ Па, а нижняя — 100 Па.

Звуковые колебания, происходящие по гармоническому закону, воспринимаются человеком как определенный **музыкальный тон** или просто **тон**. Основными характеристиками тона являются громкость и высота. **Громкость** тона определяется амплитудой колебаний по принципу — чем больше амплитуда, тем выше громкость. **Высота** звука определяется его **частотой**. Чем выше частота, т.е. чем короче период колебаний, тем более высокий звук будет слышен.

Звуковые колебания, не подчиняющиеся гармоническому закону, характеризуются еще одним качеством — **тембром**. Тембр звука определяется его гармоническим спектром, так как для человеческого уха важны только частоты и амплитуды тонов, входящих в состав звука.

Большое значение для практической деятельности человека представляет явление **акустического резонанса**. Это явление имеет место при совпадении частоты вынужденных колебаний тела, вызванных звуковой волной, и частотой собственных свободных колебаний данного тела. При этом амплитуда вынужденных колебаний достигает максимального значения. Акустический резонанс используется в музыкальных инструментах (духовые инструменты, орган и пр.), в аудиотехнике и т.д.

Звуковые волны (чаще — ультразвуковые) широко применяются для измерения расстояний до различных объектов. Например, гидроакустическая локация позволяет обнаруживать подводные лодки с надводных кораблей (и наоборот), а эхолотирование применяется для измерения глубины и исследования рельефа морского дна.

По характеру распространения волны подразделяют на **линейные** (распространяются в одном измерении), **поверхностные** (в двух измерениях) и **пространственные** (в трех измерениях).

Важными разновидностями волн являются сферические и плоские волны. **Сферическими** называют волны, возникающие от точечного источника в пространстве. Их лучи направлены радиально, а волновые фронты представляют собой сферы. На плоскости такие волны будут круговыми, а их волновые фронты — окружностями. **Плоские** волны возникают от плоского или удаленного источника. Их лучи параллельны, а волновые фронты представляют собой плоскости.

Две волны, имеющие одинаковые амплитуды, частоты и длины волн и распространяющиеся одновременно в одной и той же среде в противоположных направлениях, при сложении образуют **стоячую волну**.

В однородной среде распространение волн происходит одинаково во все стороны от источника колебаний. При попадании волны в другую среду, а особенно на границе сред, характер распространения волны меняется — волна может частично перейти во вторую среду, а может, частично отразившись, продолжать распространение в первой среде. Закон отражения является общим волновым законом для всех видов волн. ■

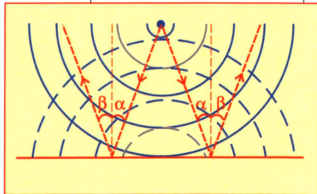
Закон отражения волн. Угол отражения волны от отражающей плоскости равен углу падения; падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости.

Известным всем примером отражения волны является эхо — свободно распространяясь в воздухе, звуковые волны при встрече с преградой отражаются от нее, и мы слышим эхо. При отражении часть энергии волны поглощается отражающей поверхностью, причем степень поглощения зависит от степени твердости отражающей поверхности (чем тверже, тем лучше отражается). С явлением отражения свя-

Волновой поверхностью (волновым фронтом) называется поверхность, на которой все точки колеблются в одинаковой фазе. Расстояние между соседними волновыми фронтами равно длине волны λ .

Линия, перпендикулярная волновой поверхности, называется лучом, причем распространение волн происходит по направлению луча. ■

Рис. 50. Угол отражения волны от отражающей плоскости равен углу падения.



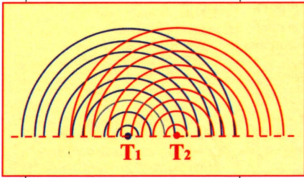


Рис. 51. В результате наложения волн от двух точечных когерентных источников возникает явление интерференции.

Наблюдая за расходящимися кругами на воде, внимательный наблюдатель может увидеть явление интерференции.

зано явление послезвучия — **реверберация**, — заключающееся в постепенном замирании звука после того, как замолк его источник.

При переходе волн во вторую среду на границе раздела двух сред происходит изменение направления распространения волн, называемое **преломлением волн**. ■

Закон преломления волн. Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред:

$$n_{12} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta},$$

где n — относительный показатель преломления.

Помимо способности к отражению и преломлению волны обладают и другими, не менее важными свойствами. При наличии не одного, а нескольких источников колебаний волны проходят одна через другую, никак не влияя друг на друга. Это явление связано с тем, что в пределах упругой деформации сжатие или растяжение тел вдоль одного направления не влияет на их упругие свойства при деформации по любым другим направлениям. Поэтому в каждой точке, которой достигают волны от разных источников, результат действия нескольких волн в любой момент времени равен сумме действия этих волн. Эта закономерность называется **принципом суперпозиции**.

Если происходит наложение волн с одинаковым периодом колебаний, то может возникнуть явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны — **интерференция волн**.

Интерференция волн возможна только при условии когерентности волн.

Когерентными называют те волны, которые имеют одинаковый период и постоянную во времени разность фаз колебаний в каждой точке.

Разность расстояний от какой-либо точки до источников колебаний называется **разностью хода** двух интерферирующих волн до этой точки.

Амплитуда колебаний будет равна нулю в тех точках пространства, в которые волны с одинаковыми амплитудой и частотой приходят со сдвигом по фазе колебаний на π или на половину периода колебаний. Различие колебаний двух когерентных источников волн на половину периода колебаний будет при условии, что разность Δl расстояний l_1 и l_2 от источников волн до этой точки равна половине длины волны или нечетному числу половин (условие интерференционного минимума):

$$\Delta l = (2k + 1)\lambda/2.$$

В точках пространства, в которые волны приходят с одинаковой фазой колебаний, наблюдаются **интерференционные максимумы**; для выполнения этого условия разность хода должна равняться целому числу волн:

$$\Delta l = k\lambda.$$

Явление отклонения направления распространения волн от прямолинейного у границы преграды называется **дифракцией** волн, при-



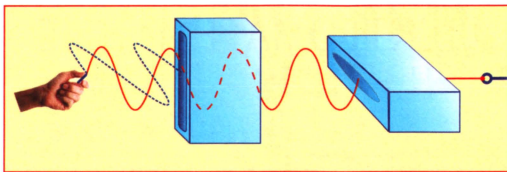


Рис. 52. Поляризация волны.

чем, чем меньше будут отверстия в преграде на пути волны, тем большие отклонения от прямолинейного направления распространения будут испытывать волны. Явление дифракции более заметно при увеличении длины волны.

Явления интерференции и дифракции наблюдаются при распространении и продольных, и поперечных волн. Но, кроме этого, у поперечных волн существует еще одно свойство — свойство **поляризации**. ■

Поляризованной волной называется такая поперечная волна, в которой колебания всех частиц происходят в одной плоскости. Например, плоскополяризованную волну можно продемонстрировать с помощью резинового шнура, при колебаниях конца шнура в одной плоскости (если конец шнура колеблется в различных направлениях, то волна, распространяющаяся вдоль шнура, не поляризована).

Поляризованную волну можно получить, поставив на пути колебаний преграду с отверстием в виде узкой щели. Щель будет пропускать только колебания шнура, происходящие вдоль нее. Поэтому волна после прохождения щели становится поляризованной в плоскости щели (рис.52). Если на пути плоскополяризованной волны поставить вторую щель, повернутую по отношению к первой на 90° , то процесс распространения волны в шнуре вообще прекратится.

Устройство, выделяющее из всех возможных колебания, происходящие в одной плоскости (в нашем случае первая щель), называется **поляризатором**, а устройство, позволяющее определить плоскость поляризации волны (вторая щель), — **анализатором**.

Некоторые закономерности распространения волн (отражение, преломление) можно объяснять на основании принципа, сформулированного в 1690 году голландским физиком Христианом Гюйгенсом (1629—1695).

Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка среды, которой достигла в данный момент волна, является точечным источником вторичных волн, распространяющихся по всем направлениям со скоростью, свойственной среде. Огибающая поверхность, т.е. поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновой фронт в следующий момент времени. Однако принцип Гюйгенса не может объяснить всех особенностей распространения волн. Поэтому французский физик Огюстен Френель (1788—1827) дополнил его представлениями о когерентности вторичных волн и их интерференции. Связав принцип Гюйгенса с принципом интерференции, Френель дал объяснение прямолинейному распространению волн в однородной среде, показав, что лучи, поляризованные перпендикулярно друг к другу, не интерferируют. Принцип интерференции позволил Френелю объяснить законы отражения и преломления взаимным погашением колебаний во всех направлениях, за исключением тех, которые удовлетворяют закону отражения. ■



Христиан Гюйгенс (1629—1695).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Особенностью механических волн является их способность распространяться в непрерывной среде — будь то газообразная, жидкая или твердые тела. В пустоте, т.е. в вакууме, механические волны не могут распространяться.



Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879).

В 1864 году английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом (1831–1879) на основании изучения экспериментальных работ Фарадея по электричеству и магнетизму была высказана гипотеза о существовании особых — электромагнитных — волн, способных распространяться в вакууме.

Отталкиваясь от того, что изменяющееся электрическое поле создает магнитное поле, которое само создает электрическое поле, и проведя количественный анализ этих соотношений, Максвелл пришел к выводу о распространении данного процесса в пространстве. То есть переменное электрическое поле в одной точке создает магнитное поле по соседству с ней, которое, в свою очередь, вызывает электрическое поле в следующей точке. Поскольку этот процесс происходит снова и снова, возникает колеблющееся электромагнитное поле, непрерывно расширяющееся в пространстве. При этом электрическое или магнитное поле распространяется независимо от способов их возникновения (будь то колебания зарядов или появление магнитов). Вычисления скорости распространения поля, выполненные Максвеллом по данным о наблюдаемом токе, индуцированном движущимися магнитами, и по данным о создаваемом токами магнитном поле, выявили, что она равна скорости света (≈ 300000 км/с).

Объяснив появление индукционного тока возникновением вихревого электрического поля при любом изменении магнитного поля, Максвелл предположил, что электрическое поле обладает такими же свойствами: при любом изменении электрического поля в окружающем пространстве возникает вихревое магнитное поле. Однажды начавшийся процесс взаимного порождения магнитного и электрического полей должен далее непрерывно продолжаться и захватывать все новые и новые области в окружа-

В линиях электропередачи используется именно переменный ток, так как при высоком напряжении его можно передавать на большие расстояния с малыми потерями.



щем пространстве. Процесс распространения переменных магнитного и электрического полей и есть электромагнитная волна.

Экспериментальным подтверждением гипотезы Максвелла явилось обнаружение в 1887 году немецким физиком Генрихом Герцем (1857–1894) электромагнитных волн, что означало победу электромагнитной концепции. Герц установил, что электромагнитные волны имеют свойства, аналогичные световым: преломление, отражение, интерференцию, дифракцию, поляризацию, ту же скорость распространения.

Электромагнитная волна не может возникнуть при постоянном токе, так как при этом изменений магнитного поля не происходит. Также она не может возникнуть в электростатическом поле, создаваемом неподвижными электрическими зарядами.

Интенсивные электромагнитные волны возникают в открытой цепи при достаточно высокой частоте электрических колебаний, достигающей до десятков мегагерц и выше.

Таким образом, основным условием возникновения электромагнитных колебаний является наличие переменного тока. **Переменным током** называется ток, изменяющийся с течением времени по гармоническому закону и существующий в колебательном контуре, в котором электромагнитные колебания не затухают со временем.

Периодом переменного тока называется промежуток времени, в течение которого величина тока (или напряжения) совершает полное колебание и принимает прежнее по величине и знаку значение.

Амплитудой переменного тока называется максимальное значение, которое может иметь сила тока (или напряжение) в том или другом направлении.

Действующим (эффективным) значением силы тока I называется сила постоянного тока, выделяющего в проводнике за то же время такое же количество теплоты, что и переменный ток:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

где I_m — амплитуда гармонических колебаний. ■

Действующее значение переменного напряжения U также в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитудного значения U_m :

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

В цепи переменного тока, в отличие от постоянного тока, существует так называемое **активное сопротивление R** , которое при низких значениях частоты переменного тока практически совпадает с его электрическим сопротивлением в цепи постоянного тока. Активное сопротивление определяется отношением мощности P переменного тока на участке электрической цепи к квадрату действующего значения силы тока I на этом участке:

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

Таким образом, мы можем найти среднюю мощность на участке цепи переменного тока по формуле:

$$P = I^2 R.$$

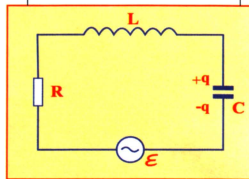


Рис. 53. Переменный ток существует в колебательном контуре с незатухающими (за счет наличия источника питания) электромагнитными колебаниями.

Генератор переменного тока — устройство, преобразующее какую-либо энергию в электрическую. Например, электромеханический индукционный генератор преобразует механическую энергию в электрическую. Основные части такого генератора — это индуктор-магнит и якорь-обмотка. При относительном вращении якоря и индуктора магнитный поток, пронизывающий обмотку, постоянно изменяется, что и приводит к появлению в якоре ЭДС индукции.

Переменный ток используется в электрической сети жилых домов, промышленных предприятий и т.д. Он представляет собой вынужденные колебания, при которых сила тока и напряжение меняются по гармоническому закону. Частота промышленного тока в странах СНГ — 50 Гц. ■

Из-за того, что в любом проводнике, по которому протекает переменный ток, возникает ЭДС самоиндукции, электрическая цепь обладает не только активным сопротивлением, но и так называемым индуктивным сопротивлением. **Индуктивным сопротивлением** X_L называется произведение циклической частоты ω на индуктивность L :

$$X_L = \omega L.$$

В конденсаторе, включенном в цепь переменного тока, также возникает сопротивление, называемое **емкостным сопротивлением** X_C конденсатора, которое находится по формуле:

$$X_C = \frac{1}{\omega C},$$

где C — емкость конденсатора.

При изучении возникновения и распространения электромагнитных волн большую роль сыграл вибратор (или диполь) Герца. Он представляет собой два стержня с шариками на концах. Стержни подключаются к индукционной катушке — источнику высокого напряжения; когда напряжение между стержнями становится достаточно большим, между шариками проскакивает искра. Вибратор Герца можно рассматривать как открытый колебательный контур. Емкостью в таком контуре является емкость между стержнями, преимущественно между их концами, на которых и накапливаются заряды при колебаниях. Сами стержни обладают индуктивностью. Контур называется открытым, поскольку, в отличие от обычного конденсатора, его поле не локализовано в ограниченном пространстве конденсатора. В окружающем вибратор пространстве возникает переменное электрическое поле. В результате появляется изменяющееся во времени вихревое магнитное поле, которое вновь рождает также вихревое электрическое поле и т.д. Так возникает электромагнитная волна.

По своим свойствам электромагнитные волны мало чем отличаются от механических.

На границе раздела двух сред электромагнитные волны частично отражаются, частично проходят во вторую среду. От поверхности диэлектрика электромагнитные волны отражаются слабо, от поверхности металла отражаются почти без потерь.

Закон отражения совпадает с законом отражения механических волн, т.е. угол отражения равен углу падения; падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости. На границе раздела двух сред происходит преломление электромагнитных волн. ■

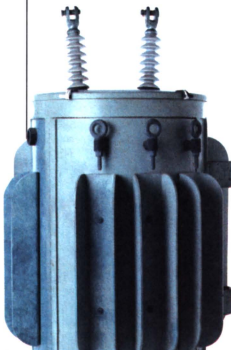
Закон преломления. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β является величиной постоянной для двух данных сред. Это отношение равно отношению скорости v_1 электромагнитных волн в первой среде к скорости v_2 во второй среде:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}.$$

При прохождении электромагнитных волн через отверстие в преграде наблюдается явление дифракции волн, т.е. отклонение направления их распространения от прямолинейного.

Когда электромагнитные волны от двух когерентных источников встречаются в одной точке, то наблюдается явление интерференции. Электро-

Устройство для понижения (или повышения) напряжения переменного тока называется трансформатором.



магнитные волны являются поперечными волнами. При распространении электромагнитной волны векторы напряженности и магнитной индукции перпендикулярны направлению распространения волны и взаимно перпендикулярны между собой.

Электромагнитное поле обладает энергией. При распространении любых электромагнитных волн происходит перенос энергии от источника волн к приемникам волн.

Отношение энергии E электромагнитного излучения, поглощаемой или излучаемой телом, ко времени t называется **потоком излучения** или **мощностью излучения**. Поток излучения обозначается Φ , измеряется в ваттах:

$$\Phi = \frac{E}{t}.$$

Отношение потока излучения Φ к площади поверхности S , на которую падает это излучение, называется **поверхностной плотностью потока излучения**. Плотность потока излучения обозначается ϕ , измеряется в ваттах на квадратный метр:

$$\phi = \frac{\Phi}{S}.$$

Плотность потока излучения зависит от угла падения волн на поверхность тела, так как с увеличением угла падения тот же поток излучения распределяется на все большую поверхность. Поток излучения, приходящий при перпендикулярном падении излучения на поверхность S_0 , при угле падения α распределяется по поверхности площадью S :

$$S = \frac{S_0}{\cos \alpha}.$$

При угле падения α плотность потока излучения ϕ равна произведению плотности потока излучения ϕ_0 при нормальном падении лучей на косинус угла падения:

$$\phi = \phi_0 \cos \alpha.$$

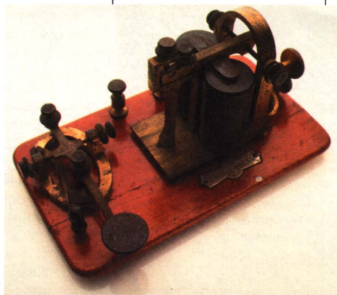
Электромагнитные волны могут быть носителями различной информации: азбуки Морзе, человеческой речи, музыки, телевизионных изображений, сигналов далеких миров, сведений о далеком прошлом нашей Вселенной, — все зависит от того, кто вложил эту информацию в электромагнитное излучение, человек или природа. Различные природные объекты являются источниками всевозможных электромагнитных волн. Свойства волн тесно связаны с источниками излучения, с их природой и физическим состоянием, с протекающими в них процессами.

Электромагнитные излучения в зависимости от длины волн обладают разнообразными свойствами. Самые длинноволновые излучения — радиоволны. К ним примыкает более коротковолновый инфракрасный диапазон. Далее располагается видимый свет, а за ним — ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение. ■



Электромагнитные волны несут нам сведения о далеком прошлом Вселенной — например, от этого космического объекта излучение шло миллионы лет.

Для того чтобы передавать сигналы при помощи электромагнитных волн, человеку понадобилась новая азбука — азбука Морзе.





Всего за 100 лет радиоприемники превратились из громоздкого прибора, способного издавать только звонок, в незаменимые в быту и способные принимать весь радиодиапазон устройства.



С помощью радиоволн можно передавать не только звуковые сигналы, но и изображения, воспроизводимые в телевизионных приемниках, или попросту — телевизорах.

Возможности практического использования радиоволн человечество обязано русскому физiku Александру Степановичу Попову (1859–1906). Он сконструировал прибор, позволяющий принимать электромагнитные сигналы, в отличие от вибратора Герша, способного только демонстрировать появление электромагнитных волн. Приемник А.С. Попова состоял из антенны, когерера, электромагнитного реле, электрического звонка и источника постоянного тока. Электромагнитные волны вызывали вынужденные колебания тока и напряжения в антенне. Переменное напряжение с антенны подавалось на два электрода, которые были расположены в стеклянной трубке, заполненной металлическими опилками, — когерер. Последовательно с когерером включалось электромагнитное реле и источник постоянного тока.

Под действием переменного напряжения высокой частоты в когерере возникали электрические разряды между отдельными опилками, частицы опилок спекались, и его сопротивление уменьшалось в 100–200 раз. Сила тока в катушке электромагнитного реле возрастала, и реле включало электрический звонок. Таким образом происходила регистрация приема антенной электромагнитной волны. После этого удар молоточка звонка по когереру встряхивал опилки и возвращал его в исходное состояние — приемник снова был готов к регистрации электромагнитных волн.

Радиосвязь осуществляется на длинных (10000–1000 м), средних (1000–100 м), коротких (100–10 м) и ультракоротких (менее 10 м) волнах. Радиоволны с различными длинами волн по-разному распространяются у поверхности Земли.

Длинные волны (ДВ) за счет дифракции распространяются далеко за пределы видимого горизонта — радиопередачи на длинных волнах можно принимать на больших расстояниях за пределами прямой видимости антенны.

Средние волны (СВ) испытывают меньшую дифракцию у поверхности Земли и потому распространяются на меньшие расстояния за пределы прямой видимости.

Короткие волны (КВ) имеют еще меньшую способность к дифракции у поверхности Земли, но благодаря способности отражаться от ионосферы их можно принять в любой точке Земли.

Ультракороткие волны (УКВ) не отражаются ионосферой и не огибают поверхность Земли в результате дифракции. Поэтому связь на УКВ осуществляется только в пределах прямой видимости антенны передатчика.

Ионосфера способна поглощать и отражать электромагнитные волны. Пропуская видимый свет, инфракрасные лучи и метровые радиоволны, ионосфера сильно отражает более длинные волны (λ больше 10–15 метров). Это явление наряду с дифракцией увеличивает дальность распространения длинных волн.

Отражательные свойства ионосферы зависят от времени суток — днем при действии солнечного излучения ионизация значительно больше, чем ночью, когда происходит только воссоединение положительных ионов и отрицательных электронов в нейтральные молекулы.

В наши дни радиоволны занимают одно из важнейших мест в техническом арсенале человечества: их применяют для радиосвязи, телевидения, радиолокации, радионавигации, медицины, металлургии и пр.

Особая роль принадлежит радиоволнам в исследовании космоса. Этим занимается один из разделов астрономии — радиоастрономия. Несмотря на то что впервые радиосигнал из космоса был принят в 1931 году, активно развиваться радиоастрономия начала лишь после окончания Второй ми-

ровой войны. Связано это с тем, что космическое радиоизлучение несет с собой очень мало энергии и требует очень чувствительных приемников радиосигналов, которые появились после войны.

Выбор радиоволн в качестве инструмента для исследования миров, удаленных от нас на миллиарды световых лет, связан с рядом их свойств. Радиоволны могут свободно проникать сквозь межзвездную пыль, газопылевые облака — там, где видимый свет проникнуть не может. Благодаря радиоволнам были открыты «радиогалактики» (галактические системы, не видные в оптическом диапазоне), загадочные квазары — внегалактические объекты с огромной мощностью радиоизлучения, пульсары — объекты, излучающие строго периодические импульсы радиоволн. Важная роль отводится радиоастрономии и в поиске внеземных цивилизаций.

Электромагнитные излучения с длиной волны меньше 1–2 мм, но больше $8 \cdot 10^{-7}$ м называются **инфракрасным излучением**.

Область спектра за красным его краем впервые экспериментально была исследована в 1800 году английским астрономом Вильямом Гершелем (1738–1822). Наблюдая Солнце сквозь темные стекла, Гершель чувствовал тепло, несмотря на то что стекло почти не пропускало света. В опытах с другими стеклами, пропускавшими много света, тепловое ощущение было почти незаметным. Чтобы выяснить, в чем дело, Гершель поместил термометр с зачерненным ртутным шариком за красный край спектра и обнаружил повышение температуры. Так были открыты «тепловые», инфракрасные лучи.

Инфракрасное излучение испускают любые нагретые тела — например, печи, батареи водяного отопления, электрические лампы накаливания. Человеческое тело также является источником инфракрасного излучения. С помощью специальных приборов инфракрасное излучение можно преобразовать в видимый свет и получать изображения нагретых предметов в полной темноте. Инфракрасное излучение применяется для сушки окрашенных изделий, стен зданий, древесины, в приборах ночного видения.

В 1801 г. немецкий физик Иоганн Риттер (1776–1810), исследуя спектр, открыл, что за его фиолетовым краем имеется область, создаваемая невидимыми лучами. Эти лучи воздействуют на некоторые химические соединения. Под действием этих невидимых лучей происходит разложение хлорида серебра, свечение кристаллов сульфида цинка и некоторых других кристаллов.

Невидимым глазом электромагнитное излучение с длиной волны меньше, чем у фиолетового света, называют **ультрафиолетовым излучением**. К ультрафиолетовому излучению относятся электромагнитные излучения в диапазоне длин волн от $4 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ м.

Ультрафиолетовое излучение способно убивать болезнетворные бактерии, поэтому его широко применяют в медицине. Именно ультрафиолетовый компонент в составе солнечного света вызывает биологические процессы, приводящие к потемнению кожи человека — т.е. к загару. В качестве источников ультрафиолетового излучения в медицине используются газоразрядные лампы. Трубки таких ламп изготавливают из кварца, прозрачного для ультрафиолетовых лучей; поэтому эти лампы называют кварцевыми лампами.

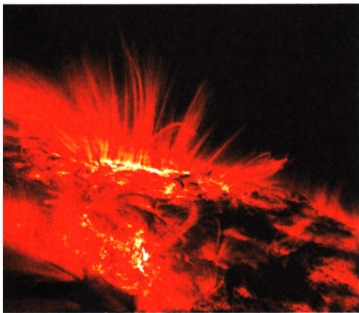
В 1895 году немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген (1845–1923) открыл излучение с длиной

Ионосферой называется верхняя часть атмосферы, начинающаяся с расстояния примерно 50 км от поверхности Земли и переходящая в межпланетную плазму на расстоянии 70–80 тыс. км. Особенностью ионосферы является высокая концентрация в ней свободных заряженных частиц — ионов и электронов. Ионизация верхних слоев атмосферы создается ультрафиолетовым и рентгеновским излучениями Солнца. ■

Как-то раз в обсерватории Кембриджского университета прошла выставка, посвященная радиоастрономии. Одним из экспонатов выставки был стол со стопкой бумаги. На каждом листе из этой стопки была надпись: «Взяв со стола эту бумажку, вы затратили больше энергии, чем радиотелескопы всего мира приняли за всю историю радиоастрономии». ■

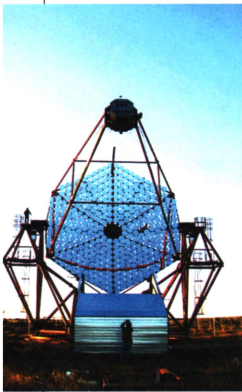
Радиоастрономия — одно из самых перспективных направлений астрономии.





Ультрафиолетовое излучение позволило по-новому увидеть процессы, происходящие на Солнце.

Применение гамма-излучения, с его высокой проникающей способностью, в астрономии (точнее, в одном из ее разделов — астрофизике высоких энергий) позволило ученым заглянуть в самые отдаленные уголки нашей Вселенной.



волны, более короткой, нежели длина волны ультрафиолетовых лучей (так называемые X-лучи), названное в дальнейшем **рентгеновскими лучами**, и исследовал их свойства: способность отражаться, поглощаться, ионизировать воздух и т.д.

Если в вакуумной трубке между нагретым катодом, испускающим электроны, и анодом приложить постоянное напряжение в несколько десятков тысяч вольт, то электроны будут сначала разгоняться электрическим полем, а затем резко тормозиться в веществе анода при взаимодействии с его атомами. При торможении быстрых электронов в веществе или при переходах электронов на внутренних оболочках атомов возникают электромагнитные волны с длиной волны меньше, чем у ультрафиолетового излучения, которые и называются рентгеновскими лучами.

Рентгеновские лучи невидимы глазом. Они проходят без существенного поглощения через значительные слои вещества, непрозрачного для видимого света. Обнаруживают рентгеновские лучи по их способности вызывать определенное свечение некоторых кристаллов и действовать на фотопленку. Способность рентгеновских лучей проникать через толстые слои вещества используется для диагностики заболеваний внутренних органов человека. В технике рентгеновские лучи применяются для контроля внутренней структуры различных изделий, сварных швов. Рентгеновское излучение обладает сильным биологическим действием и применяется для лечения некоторых заболеваний.

За открытие лучей, носящих его имя, Рентгену в 1901 году первому среди физиков была присуждена Нобелевская премия. ■

Гамма-излучение — это коротковолновое электромагнитное излучение. На шкале электромагнитных волн оно граничит с жестким рентгеновским излучением, занимая область более высоких частот. Гамма-излучение обладает чрезвычайно малой длиной волны ($\lambda < 10^{-10}$ см).

Гамма-излучение возникает при распадах радиоактивных ядер, элементарных частиц, при аннигиляции пар частица-античастица, а также при прохождении быстрых заряженных частиц через вещество.

Гамма-излучение обладает большой проникающей способностью, т.е. может проникать сквозь большую толщу вещества без заметного ослабления. Основными источниками гамма-излучения служат естественные и искусственные радиоактивные изотопы, а также электронные ускорители. Гамма-излучение находит применение в технике, например для обнаружения дефектов в металлических деталях — гамма-дефектоскопия. В радиационной химии гамма-излучение применяется для химических превращений, например в процессах полимеризации. Гамма-излучение используется в пищевой промышленности для стерилизации продуктов питания.

Оно нашло также применение в медицине — для лечения опухолей, для стерилизации помещений, аппаратуры и лекарственных препаратов. Гамма-излучение используется в растениеводстве для получения различных мутаций сельскохозяйственных растений с последующим отбором хозяйственно-полезных форм.

Высокая проникающая способность гамма-излучения используется в астрофизике высоких энергий, позволяя заглянуть в самые недоступные уголки нашей Вселенной. ■

ОПТИКА

Оптика — это раздел физики, в котором изучают свойства света, его физическую природу и взаимодействие с веществом. К видимому свету относят электромагнитные волны с частотой от $1,5 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{16}$ Гц. Видимый свет располагается между инфракрасным и ультрафиолетовым участками спектра электромагнитных излучений. Эту область спектра обычно называют оптической областью. Ей соответствуют длины волн λ от $2 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-8} м.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Оптика относится к одному из древнейших разделов физики. Первые открытия в оптике были сделаны уже в древности. Тогда были открыты два закона геометрической оптики: закон прямолинейного распространения света и закон отражения света.

К познанию этих законов древние мыслители пришли, вероятно, очень давно. Опыт повседневной жизни: наблюдение тени, перспективы, астрономические наблюдения — привел к возникновению понятия луча света, а также к понятию прямолинейного распространения света. Наблюдая затем явление отражения света, в частности в металлических зеркалах, которые были распространены в то время, древние пришли к пониманию закона отражения света.

Эти два закона были описаны знаменитым греческим ученым Евклидом, жившим в III веке до нашей эры. С помощью этих законов Евклид объяснил множество наблюдаемых явлений — например, явление отражения света от плоских и даже сферических зеркал. Он геометрически вывел законы перспективы из четырнадцати исходных положений, которые были результатом оптических наблюдений. Например:

- лучи, исходящие из глаз, распространяются прямолинейно и расходятся в бесконечность;
- видимы те предметы, на которые падают зрительные лучи, и невидимы те, на которые зрительные лучи не падают;
- предметы, видимые под большими углами, кажутся больше, видимые под меньшими углами, кажутся меньше, а видимые под равными углами, кажутся одинаковыми;
- все, что видимо, видимо в прямолинейном направлении и т.д.

Исследованием отражения света плоскими и сферическими зеркалами занимался еще один знаменитый ученый древности — Архимед. Он знал свойство вогнутого сферического зеркала собирать световые лучи в фокусе. Согласно легенде, он даже смог сжечь неприятельский флот, используя щиты воинов как зеркала. Кроме того, Архимед в концепцию «лучей зрения» ввел поправки, основанные на влиянии величины зрачка на результат измерения.

Наблюдая явление отражения света в зеркалах (которые появились, в том или ином виде, одновременно с человеком), древние пришли к пониманию закона отражения света.



Основной задачей всей геометрической оптики является получение изображений точечных источников света, а также протяженных предметов.

Изображением точечного источника света S называется такая точка S' , которая является точкой пересечения и расхождения световых лучей из источника света S и которая воспринимается как источник света. В отличие от реального источника света, из которого лучи света расходятся во все стороны, из изображения лучи расходятся под определенным углом, поэтому его можно видеть не из любого положения. ■

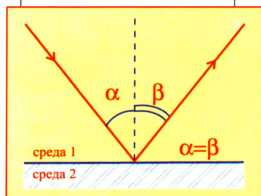


Рис. 54. Закон отражения: угол падения равен углу отражения.

Кроме закона прямолинейного распространения и отражения света ученые древности имели представление о преломлении света и даже пытались установить закон преломления.

При распространении в однородной среде свет движется прямолинейно. Прямая, указывающая направление распространения света, называется **световым лучом**. Однако необходимо всегда помнить о том, что понятие светового луча является геометрическим понятием. На границе раздела двух сред свет может частично отразиться и распространяться в первой среде по новому направлению, а также частично пройти через границу раздела и распространиться во второй среде.

В большей или меньшей степени отражение света происходит от любых предметов. Благодаря этому мы можем видеть все освещенные тела. ■

Закон отражения. Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости, причем угол отражения β равен углу падения α .

При падении лучей света на идеальную плоскую границу раздела двух сред наблюдается так называемое **зеркальное отражение**. При зеркальном отражении отражающая свет поверхность невидима, видны только источники световых лучей. При падении параллельного пучка света на шероховатую поверхность наблюдается **диффузное**, или **рассеянное, отражение**. Каждый отдельный падающий луч при диффузном отражении подчиняется законам отражения света. Лучи, отраженные от участков такой поверхности, ориентированных различным образом по отношению к падающим лучам, не образуют параллельного пучка после отражения. В результате этого отражающая поверхность становится видимой.

В геометрической оптике важное место отводится нахождению изображений при отражении света от различных типов зеркал. **Плоское зеркало** представляет собой гладкую поверхность. Оно создает мнимое (кажущееся) изображение. Источник света S и его изображение S' расположены симметрично относительно поверхности зеркала. ■

Сферическое зеркало представляет собой гладкую сферическую поверхность. Ее **оптической осью** называется любая прямая, проходящая через центр кривизны сферической поверхности. Главная оптическая ось проходит через центр кривизны и полюс зеркала — точку, равноудаленную от границ зеркала.

Лучи, параллельные главной оптической оси, после отражения от сферического зеркала собираются в одной точке F , называемой **фокусом** зеркала. Расстояние от полюса зеркала до фокуса называется **фокусным расстоянием** f :

$$f = \frac{R}{2},$$

где R — радиус кривизны зеркала.

При построении изображения в зеркале необходимо учитывать три правила. Во-первых, луч, параллельный главной оптической оси, после отражения в зеркале проходит через фокус. Во-вторых, луч, прошедший через фокус, после отражения идет параллельно главной оптической оси. В-третьих, луч, проходящий через центр кривизны зеркала, при отражении совмещается с самим собой. Эти три луча, испущенные из данной точки

предмета (источника), после их отражения в зеркале пересекаются в одной точке, являющейся изображением источника.

При переходе из одной среды в другую происходит **преломление** света — т.е. изменение направления его распространения. Впервые исследование преломления света было осуществлено Клавдием Птолемеем почти две тысячи лет назад; в его работе «Оптика» были описаны результаты экспериментирования по преломлению света в стекле и воде, представленные в виде таблиц, очень точных для того времени. Ученый стремился выявить причину того, почему при отражении углы падения и отражения равны, а при преломлении углы падения не равны углам преломления. Птолемей посчитал угол преломления пропорциональным углу падения. В правильной форме закон преломления был открыт в XVII веке голландским физиком Виллебрордом Снеллиусом (1591–1626) и, независимо от него, французским физиком Рене Декартом (1596–1650). ■

Закон преломления. Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол падения α и угол преломления γ связаны соотношением:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n,$$

где n — постоянная величина для двух данных сред, называемая **относительным показателем преломления** второй среды относительно первой. Показатель преломления n среды относительно вакуума называется **абсолютным показателем преломления** этой среды (рис. 55).

Для двух сред с абсолютными показателями преломления n_1 и n_2 относительный показатель преломления n равен отношению абсолютного показателя преломления второй среды к абсолютному показателю преломления первой среды:

$$n = \frac{n_2}{n_1}.$$

Из двух сред та среда, которая обладает меньшим значением абсолютного показателя преломления, называется оптически менее плотной средой. Если свет переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, то угол преломления γ меньше угла падения α .

При переходе из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду угол преломления γ оказывается больше угла падения α . Наблюдая преломление света, можно увидеть, что помимо преломления происходит и отражение света от границы раздела двух сред. При увеличении угла падения интенсивность отраженного луча увеличивается. При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (например, из стекла в воздух) при постепенном увеличении угла падения может быть достигнуто такое его значения α_0 , при котором угол преломления должен стать равным $\gamma_0 = 90^\circ$:

$$a_0 = \arcsin \frac{1}{n}.$$

При достижении такого значения угла падения интенсивность преломленного луча становится равной нулю: свет, падающий на границу раздела двух сред, полностью отражается от нее.

Понятия «фокус» и «оптическая ось» впервые ввел в обиход великий немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571–1630), разработав теорию построения изображения в оптических приборах. Эти понятия применяются в оптике вплоть до настоящего времени. ■

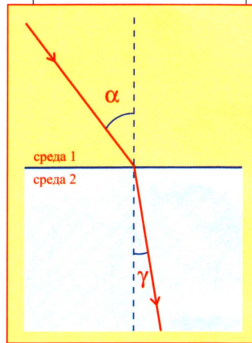


Рис. 55. Закон преломления.

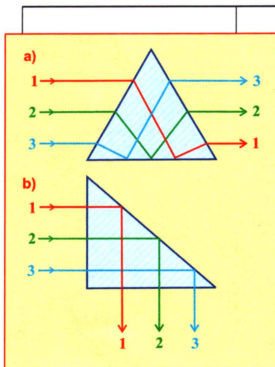
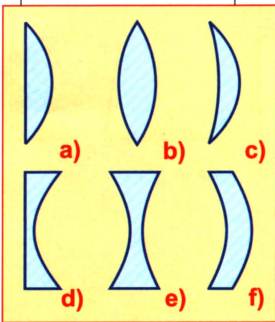


Рис. 56. Полное внутреннее отражение нашло применение в устройстве стеклянных призм: а) поворотных и б) оборащивающих.

Рис. 57. Виды линз: а) выпуклая; б) двояковыпуклая; в) выпукло-вогнутая; г) вогнутая; е) двояковогнутая; ф) вогнутовыпуклая.



Угол падения α_0 , при котором наступает полное отражение света, называется **предельным углом полного отражения**. При всех углах падения, больших и равных α_0 , происходит полное отражение света.

При отражении и при преломлении свет может проходить один и тот же путь в двух этих противоположных друг другу направлениях. Это свойство света называется **обратимостью световых лучей**. Основным принципом геометрической оптики, из которого можно вывести все ее законы, является принцип Ферма. ■

Принцип Ферма. Свет распространяется из одной точки среды в другую по пути, для прохождения которого затрачивается наименьшее время.

Для практического применения большое значение имеет преломление света на сферической границе раздела сред. Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, называется **линзой**. Линзы обычно изготавливаются из стекла, хотя могут быть и кварцевыми, и слюдяными и т.д.

Тонкой называется такая линза, толщина которой значительно меньше радиусов ограничивающих ее сферических поверхностей.

Линза, которая в середине толще, чем у краев, называется **выпуклой линзой** (рис. 57, а, б, с). Линза, которая у краев толще, чем в середине, называется **вогнутой линзой** (рис. 57, д, е, ф). Прямая, проходящая через центры сферических поверхностей линзы, называется **главной оптической осью** линзы. Точка пересечения главной оптической оси с тонкой линзой называется **оптическим центром** линзы. Прямые, проходящие через оптический центр линзы и не совпадающие с ее главной оптической осью, называют **побочными оптическими осями**.

Одним из свойств линзы является то, что луч света, идущий вдоль главной оптической оси, проходит через линзу без изменения направления распространения. В воздухе или в вакууме все лучи, параллельные главной оптической оси выпуклой линзы, после прохождения линзы отклоняются к оси и проходят через одну точку **F** на главной оптической оси. Поэтому выпуклые линзы еще называют **собирающими линзами**. Точка **F** называется **главным фокусом** линзы. Плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется **фокальной плоскостью**.

У линзы два главных фокуса в однородной среде расположены на одинаковых расстояниях от ее оптического центра. Расстояние от оптического центра линзы до главного фокуса называется **фокусным расстоянием F** линзы. Все лучи, проходящие через один из ее главных фокусов, выходят из линзы параллельно главной оптической оси (рис. 58).

В вогнутой линзе все лучи (в воздухе или в вакууме), параллельные главной оптической оси, отклоняются от оптической оси, поэтому вогнутые линзы называются **рассеивающими линзами**. Продолжения лучей в противоположную сторону сходятся в одной точке **F** на главной оптической оси перед линзой. Эта точка называется **главным фокусом рассеивающей линзы**. Главный фокус рассеивающей линзы **мнимый**, так как лучи света в нем не собираются.

Расстояние **f** от собирающей линзы до изображения связано с расстоянием **d** от предмета до линзы и фокусным расстоянием **F** линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}.$$

Это уравнение называется формулой линзы и применяется для нахождения расстояния до изображения при любом расположении предмета относительно линзы. Например, если значение расстояния f получается при расчете отрицательным, то это значит, что изображение предмета мнимое и находится по ту же сторону от линзы, что и предмет.

Величина, обратная фокусному расстоянию F , называется оптической силой линзы D :

$$D = \frac{1}{F}.$$

Оптическая сила выражается в **диоптриях** (дптр). Линза с фокусным расстоянием 1 м обладает оптической силой в 1 дптр. Оптическая сила собирающей линзы положительна, оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна.

В зависимости от положения предмета относительно линзы линейные размеры изображения могут изменяться. Отношение линейных размеров H изображения к линейным размерам h предмета называется линейным увеличением Γ :

$$\Gamma = \frac{H}{h}.$$

Также в практике очень часто применяется такая оптическая система, как **призма**. Призма представляет собой прозрачное тело, ограниченное с двух сторон плоскими поверхностями, образующими между собой угол Φ , называемый **преломляющим углом призмы**. В призме световой луч дважды испытывает преломление на преломляющих гранях и изменяет свое направление. Угол δ отклонения луча призмой определяется формулой:

$$\delta = \alpha + \beta - \Phi,$$

где α — угол падения на первую грань, β — угол преломления на второй грани, Φ — преломляющий угол призмы.

В реальных условиях идеальных систем не может быть. Точно так же не бывает и идеальных оптических систем — в любой системе существуют свои погрешности. Одной из задач геометрической оптики и является нахождение способов устранения либо компенсации подобных погрешностей. ■

Погрешности оптических систем называются аберрациями. Они возникают в результате использования широких световых пучков, применяемых для получения большей освещенности предметов, а также при получении изображений предметов, значительно удаленных от главной оптической оси оптического прибора (например, при фотографировании). При отсутствии аберрации каждой точке изображения однозначно соответствует точка предмета. Это может быть достигнуто в том случае, когда изображение образуется узкими световыми пучками, падающими на оптическую систему под малыми углами к ее главной оптической оси. В реальных оптических системах эти условия выполняются очень редко. Например, сферические линзы только приблизительно удовлетворяют этим требованиям. В результате изображение полу-

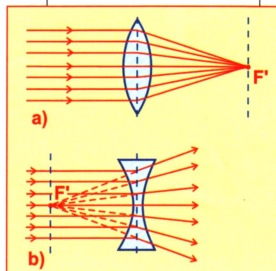
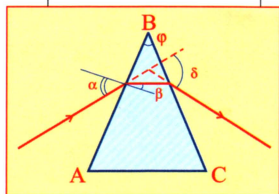


Рис. 58. Фокус линзы: а) действительный фокус собирающей линзы, б) мнимый фокус рассеивающей линзы.

Рис. 59. Ход луча в призме.



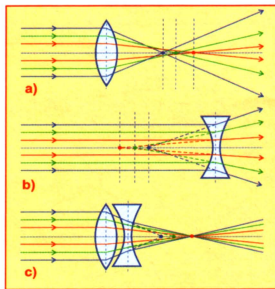


Рис. 60. Виды сферической aberrации: а) сферическая aberrация собирающей линзы, б) сферическая aberrация рассеивающей линзы, в) исправление сферической aberrации линзы.

чается недостаточно резким, мелкие детали становятся неразличимыми. Для уменьшения aberrации применяют системы линз. Существует два основных вида aberrации — сферическая и хроматическая. **Сферическая aberrация** возникает в результате того, что периферия линзы преломляет лучи света сильнее, чем центральная ее часть. К примеру, линза большого диаметра дает изображение точечного источника не в виде точки, а в виде расплывчатого светлого пятна. Это явление обусловлено использованием широких пучков световых лучей (рис. 60). Получаемые с их помощью изображения являются нерезкими, расплывчатыми. Для повышения резкости изображения оптическую систему снабжают узким отверстием (диафрагмой), через которое пропускают пучок света. Сферическую aberrацию также компенсируют путем комбинации собирающей и рассеивающей линз, подобранных соответствующим образом. ■

Хроматическая aberrация связана с зависимостью показателя преломления оптических стекол от длины волны падающего на них света. Линзы из таких стекол преломляют синий свет сильнее, чем красный (рис. 61). В результате края изображения, полученного с помощью белого света, приобретают цветную кайму. Для ослабления хроматической aberrации применяют систему из выпуклой и вогнутой линз из особых материалов (так называемая ахроматическая пара линз). Полная компенсация хроматической aberrации возможна лишь для двух значений длин волн.

Кроме того, существуют и другие виды aberrации, к которым относят дисторсию, астигматизм и кому. **Дисторсия** представляет собой погрешность оптической системы, в результате которой изображение прямоугольной сетки приобретает подушкообразную или бочкообразную форму. Прямые линии искривляются наружу или внутрь, особенно у края изображения.

Астигматизм возникает тогда, когда световые пучки (даже узкие) составляют значительный угол с главной оптической осью системы. **Кому** представляет собой погрешность оптической системы, возникающую при прохождении через нее широких пучков света от точки предмета, находящейся на побочной оптической оси. Изображение этой точки имеет вид вытянутого и неравномерно освещенного пятна в форме кометы.

Для коррекции этих видов aberrации используются сложные оптические системы, элементы которых подобраны так, что они взаимно компенсируют возникающие погрешности.

В процессе исследования окружающего мира у человека появилась потребность в приборах, позволяющих получать изображения различных объектов и увеличивать угол зрения. Так возникли **оптические приборы**. Например, для получения изображения человек придумал проектор, фотоаппарат и т.д., а для увеличения угла зрения — микроскоп, телескоп, лупу, бинокль, подзорную трубу и многое другое.

В процессе эволюции сформировался самый древний оптический прибор, подаренный нам природой, — **глаз**. Этот орган на протяжении всей человеческой истории является основным инструментом для познания окружающего мира. Рассмотрим оптическую систему глаза.

Роговая оболочка (роговица). Прозрачна и имеет в средней части сферическую форму. На ее границе с воздухом происходит преломление света, играющее основную роль при построении изображений предметов на сетчатке глаза.

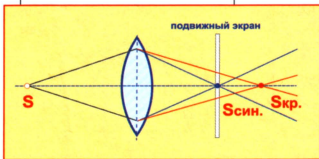


Рис. 61. Схематическое изображение хроматической aberrации.

Зрачок глаза. Способен менять свой диаметр в зависимости от освещения от 2 до 8 миллиметров.

Радужная оболочка. Практически непроницаема для лучей света.

Хрусталик. Имеет форму двояковыпуклой линзы, осуществляет дополнительное преломление света. Радиус кривизны хрусталика изменяется под действием специальной мышцы. Этот процесс называется **аккомодацией**.

Путем аккомодации изменяется фокусное расстояние оптической системы глаза и получается четкое изображение предмета на сетчатке.

Твердая белковая оболочка. Покрывает глаз и выполняет защитную функцию.

Сосудистая оболочка. Содержит сеть кровеносных сосудов, питающих глаз.

Сетчатая оболочка. Является светочувствительным слоем, содержащим разветвления зрительного нерва. Световоспринимающими элементами сетчатки являются окончания волокон зрительного нерва, делящиеся на два вида — колбочки и палочки. **Колбочки** обладают большей разрешающей способностью и чувствительностью к цвету. Их чувствительность к свету невелика. **Палочки**, обладая незначительной разрешающей способностью и нечувствительностью к цвету, напротив, очень чувствительны к свету.

Желтое пятно. Представляет собой углубление в средней части сетчатки. Это наиболее светочувствительное место глаза, содержащее только колбочки.

Слепое пятно. Нечувствительно к свету; является местом входа зрительного нерва в глазное яблоко.

Пространство между роговой оболочкой и хрусталиком называется **передней камерой**. Оно заполнено камерной влагой. Пространство между хрусталиком и сетчаткой заполнено **стекловидным телом** — прозрачным студенистым веществом. Центр вращения глазного яблока находится внутри глаза примерно на расстоянии 13 миллиметров от вершины роговой оболочки. Линия, соединяющая главную точку хрусталика с центральным углублением желтого пятна, называется **зрительной осью** глаза или линией наилучшего видения.

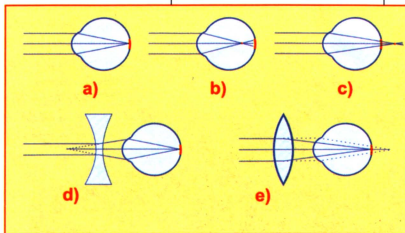
Лучи света, преломляясь на границе раздела системы «роговица — воздух», а затем в хрусталике, создают на сетчатке перевернутые изображения предметов. В нормально здоровом глазе они всегда четкие благодаря способности хрусталика к аккомодации. Дальнейшая обработка изображения происходит уже в головном мозге. Кроме того, глаз обладает способностью приспосабливаться к различным уровням яркости, называемой **адаптацией**.

Существует несколько видов нарушений нормального функционирования оптической системы глаза. Если оптическая система глаза дает изображение далеких предметов за сетчаткой, то человек страдает **дальнозоркостью** (гипермет-



Глаза человека — один из самых совершенных оптических приборов.

Рис. 6.3. Ход светового луча в глазу человека при различных нарушениях зрения и способы коррекции: а) норма, б) близорукость, в) дальнозоркость, г) коррекция близорукости, е) коррекция дальнозоркости.



Телескопы приблизили к нам звезды.



рописей). При **близорукости** глаза (миопии) изображение получается перед сетчаткой. ■

Одним из первых оптических приборов, наряду с лупой и очками, является **подзорная труба**, впоследствии ставшая основой для создания более совершенного оптического прибора — телескопа. История называет три имени возможных авторов изобретения подзорной трубы одновременно — Лиспергея, Мециуса, Янсена. Однако решающий шаг в ее изобретении был сделан Галилеем в 1609 году, когда он построил действующую зрительную трубу. Свое изобретение Галилей использовал как телескоп для наблюдения небесных тел и сделал при этом целый ряд важнейших астрономических открытий.

Подзорная труба состоит из двух линзовых систем — объектива и окуляра. Подзорная труба с собирающим окуляром называется **трубой Кеплера**, труба с рассеивающим окуляром — **трубой Галилея**. Предмет находится на очень большом расстоянии от объектива. В трубе Кеплера за фокусом объектива возникает промежуточное изображение V' . Оно расположено на расстоянии от окуляра, меньшем его фокусного расстояния. Перед окуляром возникает увеличенное мнимое и перевернутое окончательное изображение V . Увеличение, даваемое трубой Кеплера, равно:

$$N = \frac{f_1}{f_2},$$

где f_1 — фокусное расстояние объектива, f_2 — фокусное расстояние окуляра. Длина данной подзорной трубы будет равна:

$$l = f_1 + f_2.$$

Наличие промежуточного изображения V' в трубе Кеплера позволяет снабжать ее измерительной шкалой или фотопластинкой, помещенной в плоскость расположения промежуточного изображения V' . Поэтому труба Кеплера находит широкое применение в астрономии.

В трубе Галилея между объективом и окуляром не создается промежуточное изображение. Эта труба создает мнимое увеличенное прямое изображение V . Труба Галилея дает несильное увеличение удаленного предмета. Поэтому ее используют в театральных биноклях.

Кроме телескопов, построенных по типу подзорных труб — **рефракторов**, широкое применение получили зеркальные, или отражательные, телескопы — **рефлекторы**. ■

Благодаря такому оптическому прибору, как фотоаппарат, мы можем сохранять не только в памяти, но и на фотопленке наиболее значительные моменты нашей жизни.



Другим примером оптического прибора является фотоаппарат. В нем используется одно из свойств линзы, заключающееся в том, что при расположении предмета на расстоянии, большем двойного фокусного расстояния, линза дает его действительное уменьшенное изображение. Фотоаппарат состоит из объектива, обычно состоящего из нескольких линз, светонепроницаемого корпуса, видоискателя, диафрагмы и затвора. В светонепроницаемый корпус фотоаппарата помещают фотопленку, чувствительную к действию света. На ней объектив фотоаппарата создает действительное уменьшенное изображение фотографируемого предмета. Для получения четкого изображения предмета, который может быть расположен на разных расстояниях от фотоаппарата, объектив перемещают относительно фотопленки, результат наводки на резкость обычно контролируется через видоискатель. В зависимости от условий освещенности и чувствительности фотопленки путь свету от объектива к фотопленке открывается с помощью затвора на определенный интервал времени, обычно на сотые доли секунды. Световой поток регулируется и кольцевым отверстием в диафрагме за объективом, диаметр которого можно плавно изменять. ■

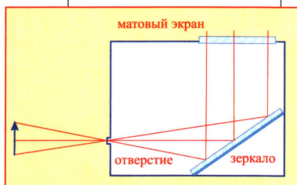


Рис. 64. Камеру-обскуру по праву можно считать предшественницей фотоаппарата.

Предшественницей фотоаппарата можно считать приспособление, известное с давних времен, — так называемую камеру-обскуру. Явление, которое используется в камере-обсуре, было известно еще в древнем Китае. Если в темное помещение через небольшое отверстие или щель проникает луч света, то на стенке возникает довольно четкая картина. Кто-то догадался просверлить в ящике маленькое отверстие и на противоположной стенке, на вставленном в нее матовом стекле, наблюдать изображения пейзажей и людей. Так появилась камера-обскура (по-латыни *obscurus* — темный).

А когда вместо отверстия, выполняющего роль объектива, применили увеличительное стекло, изображение стало настолько четким, что человеку захотелось обвести его карандашом и раскрасить. Правда, картинка получалась «вверх ногами», поэтому для устранения этой погрешности к задней стенке ящика приставили наклонно зеркало. Оно проецировало изображение на матовое стекло, вделанное в крышку, в результате чего верх и низ располагались как положено (правда, при этом менялись местами правая и левая сторона). А поскольку с помощью камеры-обскуры рисунки делались главным образом для гравирования, то больше ничего исправлять не надо было — оттиски с гравюры полностью соответствовали оригиналу. Для работы на ярком солнце применялись небольшие темные палатки. Художник с камерой сидел внутри, а наружу высовывался только объектив — трубка с линзой.

В двадцатых годах XIX века был открыт способ химического закрепления изображения на светочувствительной пластинке, вставленной в камеру-обскуру вместо матового стекла. Самую первую фотографию удалось получить француз Жозефу Нисефору Ньепсу (1765–1833). С той поры камера-обскура превратилась в известный всем нам фотоаппарат. ■

Как мы видим, для решения большинства задач практической оптики вполне достаточно средств геометрической оптики. Однако существует ряд проблем, связанных с волновой природой света. Решением этих проблем, относящихся главным образом к вопросам взаимодействия света и вещества, а также к вопросам разрешающей силы оптических приборов, занимается физическая оптика. ■

В отличие от другого оптического прибора — телескопа, позволявшего приблизить к нам огромные объекты, удаленные на колоссальные расстояния от Земли, микроскоп дал возможность увидеть объекты, имеющие невообразимо малые размеры.



Наслаждаясь видом безоблачного неба, мы вряд ли склонны рассуждать о том, что небесная синева — это одно из проявлений рассеяния света. Оказывается, синие лучи, падающие на Землю от Солнца, рассеиваются молекулами воздуха примерно в 6 раз сильнее красных, поэтому небо выглядит голубым, а солнце тем краснее, чем оно ближе к горизонту. Подобным образом объяснил голубой цвет неба в 1871 году знаменитый английский математик и физик Джон Уильям Страт (по отцу — лорд Рэлей). С тех пор рассеяние света на отдельных атомах или молекулах и вообще на маленьких частицах — с размерами, намного меньшими длины световой волны, называют рэлеевским рассеянием. ■



Олаф Ремер (1644–1710).

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Первые представления о том, что такое свет, относятся к древности. Подавляющее большинство древних мыслителей рассматривало свет как некие лучи, соединяющие светящееся тело и человеческий глаз. При этом одни из них полагали, что лучи исходят из глаз человека, они как бы ощупывают рассматриваемый предмет. Однако позже, к началу XVII века, такое представление о природе света теряет свое значение.

Другая точка зрения заключалась в том, что лучи испускаются светящимся телом и, достигая человеческого глаза, несут на себе отпечаток светящегося предмета. Такой точки зрения придерживались атомисты Демокрит, Эпикур, Лукреций. Позже, в XVII веке, эта точка зрения оформилась в корпускулярную теорию света, согласно которой свет является потоком неких частиц, испускаемых светящимся телом. ■

Третья точка зрения на природу света была высказана Аристотелем. Он рассматривал свет как распространяющееся в пространстве действие или движение. В дальнейшем его взгляды на природу света положили начало волновой теории света.

Необходимо отметить, что огромную роль в развитии оптики сыграло определение скорости света. Впервые скорость света была определена датским астрономом Олафом Ремером (1644–1710) в 70-х годах XVII века. Проведя наблюдения над затмением спутников Юпитера и измерив время их затмения, он смог из полученных данных подсчитать скорость распространения света. По его подсчетам, скорость света получилась равной 300870 км/с.

В XVII веке происходит окончательное формирование двух противоположных теорий света: корпускулярной и волновой.

С точки зрения корпускулярной теории хорошо объяснялось прямое распространение света и закон отражения света. Кроме того, закон преломления также не противоречил этой теории. Не было противоречий и с общими представлениями о строении вещества. Но, несмотря на преобладание взглядов о корпускулярной природе света, начинают развиваться и представления о его волновой природе. ■

Родоначальником волновой теории света является Рене Декарт. Согласно его взглядам, свет — это нечто вроде давления, передающегося через тонкую среду от светящегося тела во все стороны. Если тело нагрето и светится, то это значит, что его частицы находятся в движении и оказывают давление на частицы той среды, которая заполняет все пространство (эфир). Давление распространяется во все стороны и, доходя до глаза, вызывает в нем ощущение света. Однако необходимо отметить то, что взгляды Декарта носили чисто умозрительный характер. ■

Первое открытие, свидетельствующее о волновой природе света, было сделано итальянским ученым Франческо Гримальди (1618–1663), который заметил, что если на пути узкого пучка световых лучей поставить предмет, то на экране, поставленном за ним, не получается резкой тени. Край тени размыты, кроме того, вдоль тени появляются цветные полосы.

Открытое им явление ученые назвали дифракцией. Гримальди объяснял это явление тем, что свет — это флюид (тонкая неощутимая жидкость) и при встрече с препятствием возникают волны этого флюида. ■

Дифракцией света называется явление огибания световыми волнами малых препятствий, встречающихся на пути их распространения. Например, при прохождении света через малое круглое отверстие на экране вокруг центрального светлого пятна наблюдаются чередующиеся темные и светлые кольца. Чем меньше размеры экрана или отверстия, тем сильнее дифракция света. ■

Вторым важным открытием, относящимся к физической оптике, было открытие интерференции света. Важная роль в исследовании интерференции принадлежит английскому физiku Роберту Гуку (1635–1703). Гук считал, что свет — это колебательные движения, распространяющиеся в эфире. Он даже высказывал предположение, что эти колебания являются поперечными. При изучении цвета мыльных пленок и тонких пластинок из слюды он обнаружил, что эти цвета зависят от толщины мыльной пленки или слюдяной пластинки. Явление интерференции света в тонких пленках Гук объяснял тем, что от верхней и нижней поверхности тонкой (например, мыльной) пленки происходит отражение световых волн, которые, попадая в глаз, производят ощущение различных цветов.

Световые волны частично отражаются от поверхности тонкой пленки, частично проходят в нее. На второй границе пленки вновь происходит частичное отражение волн. Световые волны, отраженные двумя поверхностями тонкой пленки, распространяются в одном направлении, но проходят разные пути. При разности хода Δl , кратной целому числу длин волн λ :

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2},$$

наблюдается интерференционный максимум. При разности Δl , кратной нечетному числу половин:

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

наблюдается интерференционный минимум. Когда выполняется условие максимума для одной длины световой волны, то оно не выполняется для других длин волн. Поэтому освещаемая белым светом тонкая бесцветная прозрачная пленка кажется окрашенной. При изменении толщины пленки или угла падения световых волн разность хода изменяется и условие максимума выполняется для света с другой длиной волны. ■

Третье важное открытие, относящееся к волновой оптике, было сделано в 1669 году датским ученым Бартолином. Он открыл явление двойного лучепреломления в кристалле исландского шпата. Бартолин обнаружил, что если смотреть на какой-либо предмет через кристалл исландского шпата, то видно не одно, а два изображения, смещенные друг относительно друга. Это явление затем исследовал Гюйгенс и попытался дать ему объяснение с точки зрения волновой теории света.

Гюйгенс полагал, что все мировое пространство заполнено тонкой неощутимой средой — эфиром, который состоит из очень маленьких упругих шариков. Эфир заполняет также пространство между атомами, образуя-

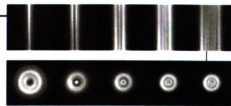


Рис. 62. Дифракция света.

Дифракция света используется в так называемой дифракционной решетке, представляющей собой прозрачную пластинку с нанесенной на нее системой параллельных непрозрачных полос, расположенных на одинаковых расстояниях d друг от друга.

При падении на решетку монохроматической волны с плоским волновым фронтом в результате дифракции из каждой щели свет будет распространяться не только в первоначальном направлении, но и по всем другим направлениям.

Если за решеткой поставить собирающую линзу, то на экране в фокальной плоскости параллельные лучи от всех щелей соберутся в одну полосу. Параллельные лучи, идущие от краев двух соседних щелей, имеют разность хода:

$$\Delta l = d \sin \varphi,$$

где d — расстояние между соответствующими краями соседних щелей, называемое **периодом решетки**, φ — угол отклонения световых лучей от перпендикуляра к плоскости решетки. При равенстве разности хода Δl целому числу длин волн:

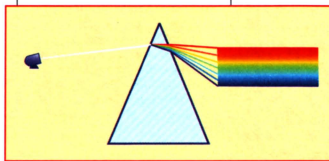
$$d \sin \varphi = k \lambda,$$

где λ — длина волны падающего света, наблюдается интерференционный максимум света. Линза не вносит разности хода. Таким образом, условие интерференционного максимума для каждой длины световой волны выполняется при своем значении угла дифракции φ . В результате при прохождении через дифракционную решетку пучок белого света разлагается в спектр. ■



Явление разложения белого солнечного света на составляющие люди наблюдают издавна в виде радуги.

Рис. 65. При прохождении через призму происходит разложение белого света на семь составляющих цветов.



шими обычные тела. По его мнению, распространение света — это процесс передачи движения от шарика к шарiku. Для того чтобы показать способность волновой теории объяснить прямолинейное распространение света, Гюйгенс выдвигает свой, уже известный нам, принцип. Основываясь на этом принципе, он дал объяснения закону прямолинейного распространения света, законам отражения и преломления. Но, как известно, принцип Гюйгенса не мог объяснить явления дифракции и интерференции. Кроме того, теория Гюйгенса была теорией бесцветного света.

Первым, кто смог разобраться в явлении разложения белого света призмой в спектр, был Исаак Ньютон. В 60-е годы XVII века он открыл явление дисперсии света и простых цветов. Изучая явление разложения белого света в спектр, Ньютон пришел к заключению, что белый свет является сложным светом. Он представляет собой сумму простых цветных лучей. Для того чтобы подтвердить вывод о том, что белый свет состоит из простых цветных лучей и разлагается на них при прохождении через призму, Ньютон провел следующий опыт.

В экране, на котором наблюдался спектр, делалось также малое отверстие. Через отверстие пропускали уже не белый свет, а монохроматический пучок света, т.е. свет, имеющий определенную окраску. На пути этого пучка Ньютон ставил новую призму, а за ней новый экран. Этот пучок света отклонялся призмой как одно целое, под определенным углом. При этом свет не изменял своей окраски. Поворачивая первую призму, Ньютон пропускал через отверстие экрана цветные лучи различных участков спектра. Во всех случаях они не разлагались второй призмой, а лишь отклонялись на определенный угол, разный для лучей различного цвета.

После этого Ньютон пришел к заключению, что белый свет разлагается на цветные лучи, которые являются простыми и призмой не разлагаются. Для каждого цвета показатель преломления имеет свое определенное значение. Открытие дисперсии подтверждало, по мнению Ньютона, корпускулярную теорию света. ■

Дисперсией света называется явление зависимости скорости света от длины волны или частоты. При прохождении через призму белого света на экране, установленном за призмой, наблюдается радужная полоса, состоящая из семи монохроматических составляющих и их полутонов. Эта полоса называется дисперсионным спектром. Этот спектр условно делится на семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Смена цвета происходит непрерывно, причем смесь всех семи цветов дает белый цвет. Если из полного спектра исключить один из цветов, то комбинация оставшихся цветов дает цвета, которые называются дополнительными.

Объясняется разложение белого света тем, что белый свет состоит из электромагнитных волн с разной длиной волны и показатель преломления света зависит от его длины волны. Наибольшее значение он имеет для света с самой короткой длиной волны — фиолетового света. Наи-

меньшим показателем преломления обладает самый длинноволновый свет — красный. Абсолютный показатель преломления света определяется отношением скорости света C в вакууме к скорости света V в среде:

$$n = \frac{C}{V}.$$

Исследования показали, что в вакууме скорость света одинакова для света с любой длиной волны. Таким образом, разложение света в стеклянной призме обусловлено зависимостью скорости распространения света в среде от длины световой волны. ■

Корпускулярная теория, как уже указывалось, не в состоянии была объяснить явление интерференции и дифракции света. Тогда Ньютон сам занялся исследованием интерференции. Он взял линзу, положил ее на стеклянную пластинку и пронаблюдал темные и светлые кольца, которые видны при освещении линзы и пластинки монохроматическим светом. Это были так называемые кольца Ньютона.

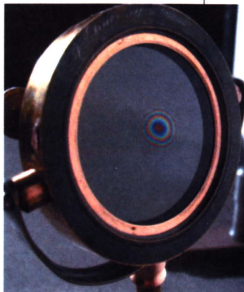
В конце XVIII века английский ученый Томас Юнг (1773—1829) пришел к выводу, что кольца Ньютона можно объяснить с точки зрения волновой теории света, опираясь на принцип интерференции. Именно он впервые и ввел название «интерференция» (от латинских слов «inter» — «взаимно» и «ferio» — «ударяю»).

По мнению Юнга, кольца Ньютона в отраженном свете возникают в результате интерференции двух лучей света, отраженных от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, образованной линзой и стеклянной пластинкой. От толщины этой прослойки будет зависеть разность хода между указанными лучами. В частности, они могут усиливать или гасить друг друга. В первом случае мы видим светлое кольцо, во втором — темное. Если свет, освещающий установку, белый, то будут наблюдаться цветные кольца. По расположению колец для разных цветов можно подсчитать длину волны соответствующих цветных лучей. Юнг проделал этот расчет и определил длину волны для разных участков спектра.

Существенное влияние на развитие волновой теории оказал французский инженер Огюстен Френель (1788—1827). Он дал объяснение прямолинейному распространению света, показав, что лучи, поляризованные перпендикулярно друг к другу, не интерферируются. В опытах по дифракции света он установил, что дифракционные полосы появляются вследствие интерференции лучей. Принцип интерференции позволил Френелю законы отражения и преломления объяснить взаимным погашением световых колебаний во всех направлениях, за исключением тех, которые удовлетворяют закону отражения. Ему удалось экспериментально доказать, что световые лучи могут воздействовать друг на друга, ослабляться и даже почти полностью погашаться в случаях согласных колебаний, что и позволило ему дать объяснение явлению дифракции. Основное внимание Френель уделял опытам по дифракции света, для которой разработал специальную теорию. Эта теория основывалась на усовершенствованном принципе Гюйгенса, который мы уже рассматривали выше как принцип Гюйгенса — Френеля. Используя этот принцип, Френель исследовал разные случаи дифракции и рассчитал расположение полос для этих случаев.

В XVII веке большое внимание уделялось исследованию явления двойного лучепреломления. Датский физик Бартолин наблюдал, что когда на кристалл исландского шпата падает луч света, то он при преломлении раздваивается. Если смотреть на точечный источник света через этот кристалл, то можно увидеть не один, а два таких источника. Это явление зависит от ориентации кристалла относительно луча. В кристалле есть направление, по

Для того чтобы запомнить чередование цветов в спектре, обычно предлагают запомнить следующую фразу: «Каждый Охотник Желает Знать Где Скрывается Фазан», где заглавные буквы каждого слова являются первыми буквами в названии соответствующего цвета — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. ■



Кольца Ньютона.

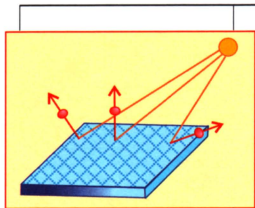


Рис. 66. Луч света, падая на чистый металл, может выбить из него электроны.

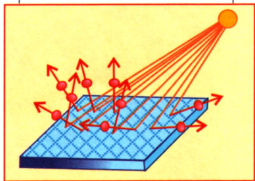


Рис. 67. Больше количество света выбивает больше электронов с той же кинетической энергией.

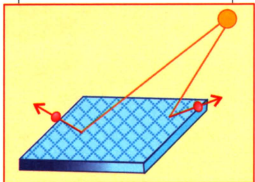


Рис. 68. Меньше света — меньше электронов.

которому раздвигание луча не происходит. Это направление называется **оптической осью кристалла**.

Исследуя явление двойного лучепреломления в начале XIX века, французский инженер Малюс обнаружил, что если смотреть через кристалл исландского шпата на изображение солнца в стекле, то при одних положениях этого кристалла видно два солнца, а при определенном положении стекла и кристалла одно из изображений пропадает, даже если световые лучи направлены не вдоль оптической оси. Так было открыто явление поляризации света. ■

Интенсивность светового пучка, проходящего через некоторые прозрачные кристаллы, зависит от взаимной ориентации двух кристаллов. При одинаковой ориентации кристаллов свет проходит через второй кристалл без ослабления. Если же второй кристалл повернут на 90° от первоначального положения, то свет через него не проходит. При прохождении через первый кристалл происходит поляризация света, т.е. кристалл пропускает только такие волны, в которых колебания вектора $\vec{E}$ напряженности электрического поля совершаются в одной плоскости. Эта плоскость называется **плоскостью поляризации**. Если плоскость, в которой пропускаются колебания вторым кристаллом, совпадает с плоскостью поляризации, поляризованный свет проходит через второй кристалл без ослабления. При повороте кристалла на 90° поляризованный свет не проходит через кристалл. Анализируя явления поляризации и двойного лучепреломления, Юнг и Френель сделали вывод о поперечности световых волн. С помощью этой гипотезы Френель исследовал указанные явления и разработал теорию прохождения поперечных волн через двозлоупреомляющее тело. Новые исследования интерференции и дифракции света, в частности изобретение дифракционной решетки, все больше и больше подтверждали волновую теорию света. К 40-м годам XIX века эта теория стала общепризнанной.

Одним из наиболее трудных для волновой теории света был вопрос о том, что же колеблется при распространении световых волн, в какой среде они распространяются.

На вопрос о природе света и механизме его распространения давала ответ гипотеза Максвелла. На основании совпадения экспериментально измеренного значения скорости света в вакууме со значением скорости распространения электромагнитных волн Максвелл высказал предположение, что свет — это электромагнитные волны. Его гипотеза подтверждается многими экспериментальными фактами. Представлениям электромагнитной теории света полностью соответствуют экспериментально открытые законы отражения и преломления света, явления интерференции, дифракции и поляризации света.

Однако электромагнитная теория света не в состоянии объяснить законы фотоэффекта, явления взаимодействия света с веществом, в которых проявляются корпускулярные свойства света. ■

Фотоэлектрическим эффектом или фотоэффектом называется явление испускания электронов веществом под действием света, открытое в 1887 году Генрихом Герцем. Фотоэффект подчиняется ряду закономерностей:

— энергия освобожденных электронов, называемых фотоэлектронами, абсолютно не зависит от интенсивности света;

— повышение интенсивности приводит к увеличению числа фотоэлектронов, но не их скорости;

— число фотоэлектронов пропорционально интенсивности света;

— скорость электронов зависит только от частоты падающего света: с увеличением частоты энергия фотоэлектронов возрастает линейно.

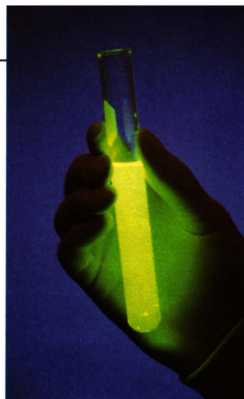
Все тела, кроме теплового излучения, в результате различных внешних воздействий дают избыточное излучение, которое не определяется температурой тела. **Люминесценцией** называют все виды свечений, возбуждаемых за счет любого внешнего источника энергии. Длительность люминесценции после прекращения внешнего воздействия значительно превышает период световых колебаний, что позволяет отличать ее от отражения и рассеяния света и пр.

Люминесценция обусловлена колебаниями небольшого количества атомов или молекул вещества, которые под действием источника энергии переходят в возбужденное состояние. Излучение возникает в результате переходов атомов или молекул из этих состояний в невозбужденное или менее возбужденное состояние, в результате чего высвобождается определенная энергия. Кратковременная люминесценция называется **флюоресценцией**. ■

Благодаря развитию волновой оптики человек открыл явление голографии. Физическая идея голографии состоит в том, что при наложении двух световых пучков, при определенных условиях, может возникнуть интерференционная картина, то есть в пространстве возникают максимумы и минимумы интенсивности света. Для того чтобы эта интерференционная картина была устойчивой какое-то время и ее можно было записать, эти два пучка должны обладать определенными свойствами — они должны быть взаимно когерентными (т.е. у них должна быть одна и та же длина волны) и, кроме этого, за время регистрации должна быть одна фаза колебаний, то есть колебания светового поля должны быть синхронными. Практически это достигается тем, что два пучка образуются делением пучка одного источника излучения, излучающего строго одну длину волны (лазер со специальными параметрами излучения). Так как длина волны света достаточно мала, то расстояние между интерференционными максимумами и минимумами тоже мало — порядка 1 мкм, поэтому для регистрации применяются специальные мелкозернистые фотоземельсы.

Лазерный луч расщепляется на два пучка, расширяется оптикой, чтобы осветить весь объект целиком. Один пучок, называемый «объектным», направляется на объект, освещающий его так, чтобы отраженное от него излучение попадало на фотопластинку. Второй пучок, который называют «опорным», направляется прямо на фотопластинку. Эти два пучка будут интерферировать на поверхности фотопластинки, и при рассмотрении под микроскопом поверхность пластинки будет покрыта множеством интерференционных линий, колец. Это и есть запись структуры волнового поля, отраженного объектом.

Полученная голограмма носит название пропускающей голограммы. Если теперь эту голограмму осветить пучком лазерного света (на просвет, отсюда и название — пропускающая), то можно будет увидеть восстановленное изображение, расположенное точно в том месте, где ранее, при съемке, находился объект. Происходит это в результате того, что лазерный свет, проходя через фотопластинку с записанной ранее структурой светового поля, приобретает все свойства светового потока, который ранее, при записи, отражался объектом. ■



Люминесценция возникает в результате перехода атомов в менее возбужденное состояние.

Термин «голография» (Holography) образован сочетанием слов «полный, весь» и «рисовать, записывать», так что несколько свободный перевод термина может звучать как «наиболее полная запись образа объекта». В наиболее общем виде идея голографии может быть сформулирована так — если каким-то способом точно зафиксировать структуру светового поля, исходящего от объекта, записать ее на какой-либо носитель, а затем восстановить это поле с достаточной точностью, то наблюдатель не сможет различить, наблюдает ли он сам объект или же его имитацию. В более узком смысле термин «голография» обозначает технологию (точнее, пакет технологий, объединенных общей идеей) такой «полной» записи волнового поля. ■

Квантовая механика — это наука о строении и свойствах атомных объектов и явлений. ■

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Как уже упоминалось в предыдущем разделе, **фотоэффект** — явление испускания электронами под действием света — был открыт в 1887 году Г. Герцем. В 1888 году Гальвакс показал, что при облучении ультрафиолетовым светом электрически нейтральной металлической пластинки последняя приобретает положительный заряд. Основные закономерности фотоэлектрического эффекта были установлены выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым (1839–1896) в 1888–1889 годах. Используя вакуумный стеклянный баллон с двумя электродами, он исследовал зависимость силы тока в баллоне от напряжения между электродами и условий освещения электрода. Вскоре (в 1889 году) Дж. Дж. Томпсон и Ф. Ленард доказали, что при фотоэффекте свет выбивает из вещества электроны. На основании этих (и ряда других) открытий были сформулированы законы фотоэффекта.

Первый закон фотоэффекта. Количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света. ■

Второй закон фотоэффекта. Максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности. ■

Третий закон фотоэффекта. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота света ν_0 (или максимальная длина волны λ_0), при которой еще возможен фотоэффект, и если $\nu < \nu_0$, то фотоэффект уже не происходит.

Первый закон может быть объяснен с позиции электромагнитной теории света: чем больше интенсивность световой волны, тем большему количеству электронов будет передана достаточная для вылета из металла энергия. Но остальные два закона фотоэффекта противоречат этой теории. ■

Согласно электромагнитной теории, под действием света, падающего на поверхность твердого тела, должны приходить в вынужденные колебания одновременно все электроны в слое вещества такой толщины, на которую проникает в него электромагнитная (световая) волна.

Для освобождения с поверхности тела электрон должен обладать кинетической энергией, превышающей работу выхода A .

Интервал времени, в течение которого электрон может накопить энергию, необходимую для своего освобождения, можно определить, разделив работу выхода на значение энергии, приобретаемой электроном в единицу времени от электромагнитного поля.

В соответствии с электромагнитной теорией света, время запаздывания должно быть достаточно большим и составлять, по крайней мере, несколь-



Макс Планк (1858–1947).

ко десятков минут. В действительности же фотоэффект возникал сразу же после начала освещения — никакого запаздывания, хотя бы на миллионные доли секунды, в экспериментах не наблюдалось.

Для того чтобы разрешить это противоречие, понесли усилия двух величайших физиков XX столетия — Макса Планка (1858–1947) и Альберта Эйнштейна (1879–1955).

По большому счету, открытие, сделанное Максом Планком и совершившее переворот в физике, не было связано с явлением фотоэффекта. Оно было направлено на разрешение другого явления, не получившего объяснения в рамках классической физики, — излучения абсолютно черного тела. ■

Абсолютно черное тело — это тело, поглощающее электромагнитное излучение любой длины волны. Спектр излучения такого тела определяется его температурой. Наиболее точно абсолютно черному телу соответствует замкнутое непрозрачное полое тело с отверстием. Любой кусок вещества при нагревании светится и при дальнейшем повышении температуры становится сначала красным, а затем — белым. Цвет от вещества почти не зависит, для абсолютно черного тела он определяется исключительно его температурой.

Примером абсолютно черного тела является обычная или мартеновская печь. В печи любое тело не только нагревается и излучает само, но также поглощает и отражает излучение других тел, находящихся там же. Если в эту печь поместить два равных по величине шара, но сделанных из разного материала, то можно увидеть два совершенно одинаковых шара. Это происходит потому, что если шар, сделанный из одного материала, сильнее излучает «свои» лучи, то он, соответственно, и больше поглощает «чужие», в то время как другой шар, излучая меньше «своих» лучей, одновременно больше отражает «чужих». Таким образом, общий поток лучей от обоих шаров одинаков, и их нельзя отличить ни друг от друга, ни от стенок печи.

Это явление носит название закона Кирхгофа. ■

Закон Кирхгофа. Излучательная способность нагретых тел пропорциональна их поглощательной способности при той же температуре.

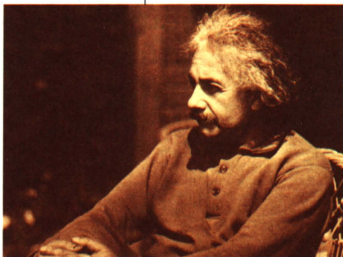
Размышляя над формулой для спектра абсолютно черного тела, Макс Планк пришел к выводу, что энергия излучения $E_{\text{изл}}$ пропорциональна его частоте ν :

$$E = h\nu,$$

где h — коэффициент пропорциональности, называемый **постоянной Планка** (постоянная Планка равна $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

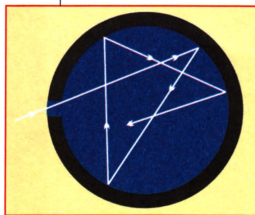
Планк пришел к выводу о том, что запас энергии колебательной системы, находящейся в равновесии с электромагнитным излучением, не может принимать любые значения. Энергия элементарных систем, поглощающих и излучающих электромагнитные волны, обязательно должна быть равна целому кратному некоторого определенного количества энергии.

Минимальное количество энергии, которое система может поглотить или излучить, называется **квантом энергии** и определяется приведенной выше формулой.



Альберт Эйнштейн (1879–1955).

Рис. 69. Схема абсолютно черного тела.



Идеи применения светового давления в космонавтике были высказаны еще Ф.А. Цандером. По его мнению, движение летательных аппаратов в космическом пространстве возможно не только по ракетодинамическому и баллистическому (под действием сил всемирного тяготения) принципам полета. Вполне реально использование «солнечного паруса» — устройства, обеспечивающего перемещение космического аппарата световым давлением солнечных лучей (солнечного ветра).

Солнечный парус представляет собой устанавливаемую на аппарат и развертываемую в полете непрозрачную пленку (например, металлизированную полимерную) большой площади, способную сообщить значительную скорость за достаточно большое время благодаря действию на нее солнечного излучения. Ограничением в применении солнечного паруса является то, что космический аппарат с подобным двигателем может двигаться только в одном направлении (от Солнца), а сила солнечного давления мала и убывает пропорционально квадрату расстояния от Солнца. ■

Паруса космических яхт, в отличие от обычных, будут «надувать» солнечный ветер.

Следующим шагом в объяснении закономерностей фотоэффекта, не укладывавшихся в рамки классической теории, было расширение Альбертом Эйнштейном гипотезы Планка об излучении света в виде отдельных порций — квантов с энергией, пропорциональной частоте света. Эйнштейн в 1905 году высказал предположение о том, что фотоэффект свидетельствует о дискретном строении света, т.е. о том, что излучаемая электромагнитная энергия распространяется и поглощается подобно частице (названной затем **фотоном**). Интенсивность падающего света при этом определяется числом световых квантов, падающих на один квадратный сантиметр освещаемой плоскости в секунду. Отсюда число фотонов, которые испускаются единицей поверхности в единицу времени, должно быть пропорционально интенсивности освещения. ■

На основе представлений о фотоне как частице, которая может излучаться или поглощаться лишь как целое, явление фотоэффекта получает простое объяснение: поглощая один фотон, электрон внутри фотокатода увеличивает свою энергию на значение энергии фотона $h\nu$. При условии $h\nu > A$ электрон может покинуть фотокатод. Если на пути к поверхности фотокатода этот электрон не растратит часть полученной от фотона энергии во взаимодействиях с электронами других атомов, то он выйдет из фотокатода с кинетической энергией:

$$E_k = h\nu - A.$$

Это соотношение называется **уравнением Эйнштейна для фотоэффекта**. Таким образом, фотонная теория света объяснила наблюдаемую экспериментально линейную зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света, вызывающего фотоэффект. Красная граница фотоэффекта в фотонной теории определяется из уравнения Эйнштейна условием равенства энергии фотона работе выхода электрона A :

$$h\nu_{\min} = A,$$

откуда

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}.$$

Отсутствие запаздывания возникновения фототока после начала освещения объясняется тем, что фотон, достигший фотокатода, практически



мгновенно может освободить из него один электрон. Пропорциональность силы фототока мощности излучения также становится очевидной — чем больше фотонов падает на поверхность тела, тем больше электронов они освобождают. ■

В 1923 году Артуром Комптоном было обнаружено, что при прохождении пучка рентгеновских лучей через слой вещества возникает рассеянное рентгеновское излучение с частотой V' , меньшей частоты V первичного пучка, т.е. происходило упругое рассеяние электромагнитного излучения малых длин волн (рентгеновского и гамма-излучения) на свободных электронах, которое сопровождалось увеличением длины волны. Согласно классической теории, при таком рассеянии длина волны не должна меняться. Эффект Комптона подтвердил правильность квантовых представлений об электромагнитном излучении как о потоке фотонов — он может рассматриваться как упругое столкновение фотона и электрона, при котором фотон передает электрону часть своей энергии, а потому его частота уменьшается, а длина волны увеличивается.

Кроме частоты и длины волны, свет, как поток частиц, имеет и такую характеристику, как **вес** — каждую минуту на квадратный сантиметр поверхности Земли падает $2 \cdot 10^{-15}$ г света, что за год составляет более 80 тысяч тонн солнечных лучей.

В 1873 году знакомый нам Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) теоретически предсказал, что свет, падая на поверхность тел, должен оказывать на них давление. Экспериментально это давление было обнаружено нашим соотечественником Петром Николаевичем Лебедевым (1866–1912) в 1899 году.

Если частица света обладает массой m , то при столкновении ее с поверхностью твердого тела может произойти либо поглощение частицы, либо ее отражение. В первом случае изменение импульса Δp частицы равно:

$$\Delta p = mv,$$

где V — скорость частицы. Во втором оно в два раза больше:

$$\Delta p = 2mv.$$

Поэтому при одинаковой плотности потока светового излучения давление света на зеркальную поверхность должно быть в два раза больше давления на черную поверхность, поглощающую свет. В опытах П.Н. Лебедева одинаковые световые потоки направлялись на два легких металлических диска, подвешенных на тонкой нити. Один диск был зеркальным и отражал падающий на него свет, второй был черным и поглощал падающий свет. При одновременном освещении двух дисков происходил их поворот вокруг вертикальной оси. По углу закручивания упругой нити подвеса можно было измерить момент сил, вызывающих этот поворот. Закручивание нити подвеса происходило в таком направлении, которое соответствует большей силе давления света на зеркально отражающий диск. ■

По сути дела, произошло возрождение корпускулярной концепции света. Но, как мы помним, свет имеет способность к дифрак-

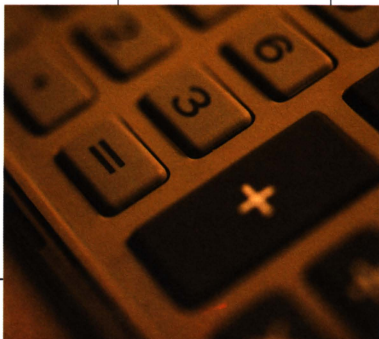
Для преобразования энергии светового излучения в энергию электрического тока применяются полупроводниковые фотоэлементы.

Полупроводниковый элемент имеет следующее устройство. В плоском кристалле полупроводника с дырочной проводимостью создается тонкий слой полупроводника с электронной проводимостью. На границе раздела этих слоев возникает **р-п-переход**. При освещении полупроводникового кристалла в результате поглощения света происходит изменение распределения электронов и дырок по энергиям. Этот процесс называется **внутренним фотоэффектом**. В результате внутреннего фотоэффекта увеличивается количество свободных электронов и дырок в полупроводнике, происходит их разделение на границе **р-п-перехода**.

При соединении противоположных слоев полупроводникового фотоэлемента проводником в цепи возникает электрический ток, причем сила тока в цепи пропорциональна мощности светового потока излучения, падающего на фотоэлемент.

Полупроводниковые фотоэлементы все шире применяются в быту. Они используются в качестве источников тока в часах, микрокалькуляторах и т.д. ■

Полупроводниковые элементы используются в микрокалькуляторах.



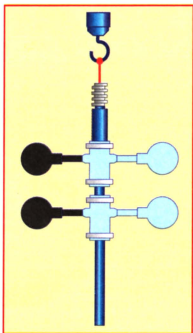
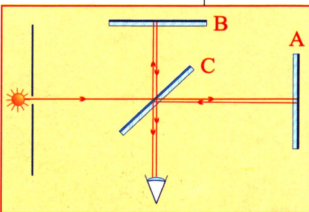


Рис. 70. Иллюстрация к опытам П. Н. Лебедева.

Рис. 71. Схема опыта Майкельсона — Морли (описание в тексте).



ции, интерференции, преломлению, отражению, дисперсии, поляризации, и все эти явления полностью объясняются на основе представлений о нем как об электромагнитной волне.

Проявление светом как волновых, так и корпускулярных свойств называется **корпускулярно-волновым дуализмом** свойств света. Смысл корпускулярно-волнового дуализма свойства света заключается в том, что свет имеет сложную природу, которая в зависимости от условий опыта лишь приблизительно может быть описана с применением привычных представлений о волнах или частицах.

Невозможно понимание квантовых свойств света без рассмотрения, пожалуй, величайшего открытия XX века — теории относительности Альберта Эйнштейна. Ее появление было обусловлено кризисом, наступившим в физике в конце XIX столетия.

Дело в том, что в то время потерпела провал попытка связать теорию эфира, заполняющего все пространство и проникающего во все тела, в котором распространялись световые волны (концепция Френеля), и электромагнитную теорию Максвелла, которая сделала понятие эфира ненужным. ■

В классической механике, исходившей из признания существования абсолютного времени, единого для всех систем отсчета и любых наблюдателей, существовало положение о том, что в любых инерциальных системах отсчета все механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях (принцип относительности Галилея). Но уравнения электродинамики Максвелла были справедливыми только в одной системе координат и несправедливыми в другой, движущейся прямолинейно и равномерно относительно первой.

Например, если мы рассмотрим движение космического корабля в космическом пространстве со скоростью V относительно Земли, то с какой скоростью относительно космонавтов будет распространяться свет от источника, находящегося на Земле? Согласно классическому закону сложения скоростей, скорость света в системе отсчета «космический корабль» будет равна:

$$v = c - u,$$

где c — скорость света относительно системы отсчета Земля, u — скорость движения космического корабля относительно Земли.

Таким образом, скорость распространения света в вакууме зависит от выбора системы отсчета и означает, что распространение света в вакууме происходит неодинаково в разных инерциальных системах отсчета, т.е. принцип относительности неприменим для электродинамических явлений. ■

В 1881 году американские физики А. Майкельсон и Э. Морли провели следующий опыт. Луч света от источника распространялся по направлению движения Земли и проходил через полупрозрачную пластину C , расположенную под углом 45° к направлению распространения луча. Пластина разделяла один луч на два.

Первый луч распространялся по направлению движения Земли, отражался зеркалом A , возвращался к пластине C и от нее — к наблюдателю. Второй луч распространялся в направлении, перпендикулярном вектору

скорости Земли, отражался от зеркала В и от него направлялся к наблюдателю.

Если бы скорость света зависела от скорости движения системы отсчета, то из-за движения прибора вместе с Землей при одинаковой длине отрезков СА и СВ время распространения света от пластины С до зеркал А и В и обратно было бы различным. Предполагаемое различие было бы обусловлено тем, что в первом случае векторы скорости света и скорости Земли направлены вдоль одной прямой, а во втором — угол между векторами скорости равен 90° .

Различие в скоростях распространения света при одинаковых значениях пройденных путей должно приводить к тому, что в лучах 1 и 2, приходящих в точку наблюдения, колебания не будут совпадать по фазе. Разность хода лучей можно определить по наблюдению интерференции световых волн, соответствующих лучам 1 и 2. Прибор, в котором наблюдается такая интерференционная картина, называется **интерферометром Майкельсона**.

В связи с тем что невозможно изготовить такой интерферометр, в котором расстояния от пластины С до зеркал А и В совершенно одинаковы, Майкельсон и Морли поступили следующим образом.

Ничего не изменяя во взаимном расположении деталей, интерферометр был повернут на 90° вокруг вертикальной оси таким образом, чтобы теперь плечо СВ было расположено по вектору скорости Земли, а плечо СА — перпендикулярно этому вектору. Разность хода лучей из-за неодинаковости плеч СВ и СА при этом не изменится, а разность хода, вызываемая сложением скоростей, изменяет свой знак на противоположный. Наблюдаемая картина интерференции при повороте прибора должна была бы измениться.

Опыты Майкельсона и Морли показали, что никакого изменения интерференционной картины при повороте интерферометра не происходит. Отсюда следовало, что скорость света в вакууме постоянна и одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Постоянство скорости света и независимость законов физики от выбора инерциальной системы вошли во взаимное противоречие.

Для того чтобы разрешить это противоречие, как мы уже указывали выше, А. Эйнштейн разработал теорию, названную **частной теорией относительности**. В ее основу легли два постулата. ■

Принцип относительности (принцип относительности Эйнштейна) — любые физические процессы протекают одинаково в различных инерциальных системах отсчета (при одинаковых начальных условиях). ■

Принцип постоянства скорости света — скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника и наблюдателя.

Явления, описываемые теорией относительности, но не объяснимые с позиций классической физики, называются **релятивистскими** (от латинского *relativus* — относительный) явлениями или эффектами.

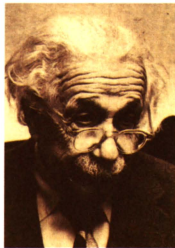
Установление того, что в природе существует некий фундаментальный предел скорости, который не может превысить ни одна частица, ни одно физическое возмущение, распространяющееся от точки к точке, является одним из главных достижений частной теории относительности. С этой предельной скоростью распространяются в вакууме свет и любое другое электромагнитное возмущение, имеющее характер волны. Эту скорость обычно принято обозначать буквой *c*.

Из постулатов теории относительности следует вывод о зависимости длительности интервалов времени и длин отрезков от выбора инерциальной

Альберт Эйнштейн (1879–1955) — выдающийся физик, создатель теории относительности, один из создателей квантовой теории и статистической физики.

Родился в Германии, в городе Ульме. С 14 лет вместе с семьей жил в Швейцарии, где в 1900 г. окончил Цюрихский политехникум. В 1902–1909 гг. служил экспертом патентного бюро в Берне. В эти годы Эйнштейн создал специальную теорию относительности, выполнил исследования по статистической физике, броуновскому движению, теории излучения и др. Работы Эйнштейна получили известность, и в 1909 г. он был избран профессором Цюрихского университета, а затем — Немецкого университета в Праге. В 1914 г. Эйнштейн был приглашен преподавать в Берлинский университет. В период своего пребывания в Берлине он завершил создание общей теории относительности, разработал квантовую теорию излучения. За открытие законов фотоэффекта и работы в области теоретической физики Эйнштейн получил в 1921 г. Нобелевскую премию. В 1933 г., после прихода к власти в Германии фашистов, Эйнштейн эмигрировал в США, в Принстон, где он до конца жизни работал в Институте высших исследований. ■

Альберт Эйнштейн.



Одним из поддающихся экспериментальной проверке следствий общей теории относительности является явление задержки распространения света в поле тяготения массивного объекта. Это замедление света в поле тяготения, впервые предсказанное И. Шапиро из Массачусетского технологического института (США), было обнаружено только в 1964 году. Шапиро указал на то, что вблизи большого тела, каким является Солнце, свет и радиосигнал должны не только отклоняться, но и распространяться с меньшей скоростью. Для сигнала, проходящего вблизи Солнца, время задержки может достигать 20 мкс, что легко обнаружить современными техническими средствами.

Шапиро с сотрудниками измерили время прохождения сигналов, отраженных от Меркурия и Венеры, а позднее провели более точные измерения с автоматическими межпланетными станциями серии «Викинг», которые совершили посадку на Марс, а также двигались по орбите вокруг Марса. Результаты замеров, выполненных с помощью этих космических аппаратов подтвердили измерения Шапиро с точностью до 0,1%. ■

Такой массивный объект, как Солнце, способен отклонить и замедлить прохождение света (и других электромагнитных излучений).

системы отсчета. В результате этого релятивистский закон сложения скоростей существенно отличается от классического закона сложения скоростей.

Если тело движется со скоростью $\vec{v}_2$ в одной системе отсчета, то в другой системе отсчета, относительно которой первая система отсчета движется со скоростью $\vec{v}_1$ ($\vec{v}_1 \uparrow \vec{v}_2$), скорость тела определяется выражением:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}},$$

где c — скорость света. ■

Согласно теории относительности, ошибочным является представление о том, что пространство имеет три измерения, а время существует отдельно от него. Одно тесно связано с другим, и вместе они образуют четырехмерный «пространственно-временной» континуум. Пространство, как и время, не существует само по себе. В отличие от ньютоновской модели, здесь нет единого течения времени. Разные наблюдатели, двигаясь с различными скоростями относительно наблюдаемых ими явлений, указывали бы разную их последовательность. В таком случае два события, одновременные для одного наблюдателя, для других произойдут в различной последовательности.

Зависимость свойств пространства-времени от движения системы отсчета приводит к тому, что сохраняющейся при любых взаимодействиях тел является величина, называемая **релятивистским импульсом**:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m_0 — масса покоя тела, $\vec{v}$ — скорость его движения.

Таким образом, классический закон сложения скоростей и классический закон сохранения импульса являются частными случаями универсальных релятивистских законов и выполняются только при значениях скоростей, значительно меньших скорости света в вакууме.

Как мы помним, импульс тела является произведением массы тела на скорость его движения. Следовательно, релятивистская масса m тела возрастает с увеличением скорости по закону:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m_0 — масса покоя тела, $\vec{v}$ — скорость его движения. Из этой формулы следует, что ни одно тело с массой покоя, не равной нулю, не может достигнуть скорости, равной скорости света в вакууме, или превзойти эту скорость.

На основании приведенных выше закономерностей А. Эйнштейн сделал вывод о том, что масса тела и его энергия взаимно связаны. При любых взаимодействиях полная энергия тела E равна произведению изменения массы m на квадрат скорости света c в вакууме:

$$E = mc^2.$$



Таким образом, Эйнштейн показал, что масса — одна из форм энергии. Даже неподвижный объект наделен энергией, заключенной в его массе.

В 1915 году Эйнштейн выдвинул **общую теорию относительности**, которая, в отличие от частной, учитывала гравитацию, то есть взаимное притяжение всех тел с большой массой. ■

Согласно теории Эйнштейна, гравитация способна «искривлять» время и пространство. Также общая теория относительности утверждает, что трехмерное пространство действительно искривлено под воздействием гравитационного поля тел с большой массой. Поскольку в концепции Эйнштейна время не может быть отделено от пространства, присутствие вещества оказывает воздействие и на время, вследствие чего в разных частях Вселенной время течет с разной скоростью. Таким образом, общая теория относительности Эйнштейна полностью отвергает ньютоновские понятия абсолютного пространства и времени. Более того, относительны не только все измерения в пространстве и времени — сама структура пространства-времени зависит от распределения вещества во Вселенной. Поскольку классическая физика рассматривает движение твердых тел в пустом пространстве, то понятие «пустого пространства» в рамках теории относительности потеряло свой смысл. В настоящее время концепции классической физики применимы лишь по отношению к так называемой «зоне средних измерений», к которой относится наш повседневный опыт.

Необходимо отметить и тот факт, что понятие «твердого тела» тоже не имеет смысла в рамках квантовой физики, а точнее, ее раздела — атомной физики.

Первые экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что твердое тело — «не совсем» твердое, что оно имеет гораздо более сложную структуру, были получены М. Фарадеем еще в 1833 году при изучении законов электролиза (открытие внутри атомов электрического заряда).

В 1897 году Джозеф Джон Томсон (1856–1940) проводил исследования по изучению электрического разряда в разреженных газах, фотоэффекта и термоэлектронной эмиссии. В результате экспериментов он установил, что при соударениях атомов в плазме электрического разряда, при нагревании вещества или освещении его ультрафиолетовым светом, из атомов любого химического элемента вырываются одинаковые отрицательно заряженные частицы. Эти частицы были названы **электронами**.

Открытие электрона послужило основанием для построения модели атома, которая была названа в честь первооткрывателя электрона **моделью Томсона**. По его мнению, атом представляет собой облако положительно заряженной материи, имеющей форму сферы диаметром в 10^{-8} см. В это облако были вкраплены отрицательно заряженные электроны. Сумма положительных зарядов уравнивается равной суммой отрицательных, поэтому атом нейтрален. По выражению самого автора, эта модель напоминает «пудинг с изюмом», где изюмом являются электроны.

Электрический заряд e отдельных электронов впервые был измерен в 1909 г. в опытах Роберта Милликана (1868–1953). Он оказался одинаковым у всех электронов.

Большую роль в развитии представлений о сложной структуре атомов сыграло открытие явления радиоактивности. ■

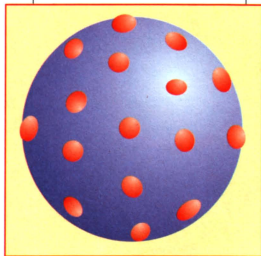
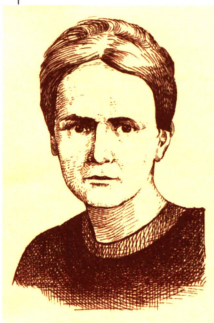


Рис. 72. Модель атома Томсона самому автору напоминала пудинг с изюмом.



Пьер Кюри (1859–1906).



Мария Склодовская-Кюри (1867–1934).

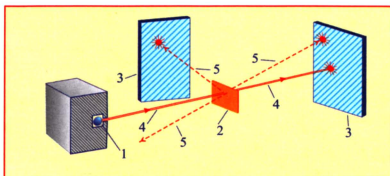
Явление радиоактивности (от слова «радиус» — «луч»), или спонтанного распада ядер, было открыто французским физиком Анри Беккерелем (1852–1908) в 1896 году благодаря случайности. Он обнаружил, что уран и его соединения испускают лучи или частицы, проникающие сквозь непрозрачные тела и способные засвечивать фотопластинку. Беккерель установил, что интенсивность излучения пропорциональна только концентрации урана и не зависит от внешних условий (температура, давление) и от того, находится ли уран в каких-либо химических соединениях.

В 1897 году исследованиями урановых лучей занялись супруги Кюри — Мария Склодовская-Кюри (1867–1934) и Пьер Кюри (1859–1906). Они доказали, что радиоактивные излучения испускаются не только атомами урана, но и атомами некоторых других элементов. По радиоактивному излучению ими были открыты два неизвестных ранее химических элемента — радий и полоний.

Английскими физиками Эрнестом Резерфордом (1871–1937) и Фредериком Содди (1877–1956) было доказано, что во всех радиоактивных процессах происходят взаимные превращения атомных ядер химических элементов. Изучение свойств излучения, сопровождающего эти процессы в магнитном и электрическом полях, показало, что оно разделяется на α -частицы (ядра гелия), β -частицы (электроны) и γ -лучи (электромагнитное излучение с очень малой длиной волны).

Исследуя явление рассеяния быстрых заряженных частиц при прохождении через тонкие слои вещества, Резерфорд добился большого прогресса в изучении структуры атомов. В этих опытах узкий пучок α -частиц, испускаемых радиоактивным веществом, направлялся на тонкую металлическую пластинку. За пластиной помещался экран, покрытый слоем кристаллов сульфида цинка, способных светиться под ударами быстрых заряженных частиц. Резерфорд обнаружил, что большинство α -частиц отклоняется от прямолинейного пути на углы не более 1° – 2° . Однако небольшая доля α -частиц испытывала отклонение на значительно большие углы. Это явление Резерфорд объяснил тем, что положительный заряд в атоме не распределен равномерно в шаре радиусом 10^{-10} м, как в модели Томсона, а сосредоточен в центральной части атома в области значительно меньших размеров. В этой центральной положительно заряженной части атома — **атомном ядре** — сосредоточена почти вся масса атома. Расчеты Резерфорда показали, что радиус атомного ядра равен примерно 10^{-15} м. Резерфорд предположил, что атом устроен подобно планетной системе. Как вокруг Солнца на больших расстояниях от него обращаются планеты, так электроны в атоме обращаются вокруг атомного ядра. Радиус круговой орбиты самого далекого от ядра электрона и есть радиус атома. Такая модель атома была названа «**планетарной**» моделью.

Рис. 73. Используя прибор такого типа с альфа-частицами, испускаемыми радием, Э. Резерфорд установил, что, хотя основная часть частиц проходит сквозь золотую фольгу, на большие углы рассеивается больше частиц, чем должно быть в соответствии с томсоновской моделью атома. Это было истолковано как указание на то, что в центре атома находится малое ядро: 1 — радий, 2 — золотая фольга, 3 — экран из сульфида цинка, 4 — пучок α -частиц, 5 — рассеянные α -частицы (малое число).



Вскоре после появления «планетарной» модели атома было обнаружено, что от количества электронов зависят химические свойства элемента. Наши сегодняшние знания позволяют составить периодическую таблицу элементов, последовательно добавляя протоны к ядру самого легкого атома, состоящего из одного протона и одного электрона — атома водорода, а также соответствующее число электронов к «оболочке» атома. Взаимодействие между атомами порождает различные химические процессы, так что вся химия может быть понята на основе законов атомной физики. Однако, согласно электродинамике Максвелла, такой атом не может быть устойчивым: двигаясь по круговым (или эллиптическим) орбитам, электрон испытывает ускорение, а поэтому он должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения вокруг ядра. Это, в свою очередь, будет приводить к уменьшению энергии. Потеря энергии приведет электрон к падению на ядро. Таким образом, подобный атом не может существовать в реальности. Разработка следующей модели атома принадлежит Нильсу Бору (1885–1962). Взяв за основу модель Резерфорда, он использовал и идеи квантовой теории. Свои представления о структуре атома Бор сформулировал в виде следующих постулатов. ■

Постулат первый. Атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарном состоянии атом не излучает. ■

Постулат второй. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитного излучения. Энергия фотона равна разности энергий атома в двух стационарных состояниях:

$$h\nu = E_m - E_n,$$

где h — постоянная Планка.

Различные возможные стационарные состояния атома, образованного из атомного ядра и электрона, определяются, по Бору, соотношением:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi},$$

где m — масса электрона, v — его скорость, r — радиус круговой орбиты, n — целое число, h — постоянная Планка.

Все стационарные состояния, кроме одного, являются стационарными лишь условно. Бесконечно долго каждый атом может находиться лишь в стационарном состоянии с минимальным запасом энергии. Это состояние атома называется **основным**. Все остальные стационарные состояния атома называются возбужденными. ■

В результате соударения с другим атомом, с заряженной частицей или при поглощении фотона



«Планетарная модель» атома Резерфорда.

Ответив на часть вопросов, теория Бора поставила еще больше новых. По его мнению, электрон мог вращаться только на разрешенных орбитах, на которых он не излучал энергии. Энергия излучалась лишь при переходах с одной орбиты на другую. Но возникает вполне резонный вопрос — где же находился электрон в процессе перехода? Существовал ли он вообще между разрешенными орбитами, и существовал ли он, в обычном смысле, когда находился на разрешенных орбитах?

Несмотря на то что теория Бора успешно объясняла свойства атома водорода, она не смогла дать количественного описания атомов других элементов. ■

Нильс Бор (1885–1962).



Существует два вида спектра — сплошной (тепловой) и линейчатый.

Тепловой спектр содержит все длины волн, излучается он при нагревании твердых тел и не зависит от их природы.

Линейчатый спектр состоит из набора отдельных линий, возникает при нагревании газов и паров (т.е. когда малы взаимодействия между атомами) и неповторим для каждого элемента. Линейчатые спектры элементов не зависят от вида химических соединений, составленных из этих элементов.

Нейтрон (n), нейтральная элементарная частица с массой, несущественно превышающей массу протона. Нейтроны устойчивы только в составе ядер. Масса нейтрона равна $1,7 \cdot 10^{-24}$ г. Свободный нейтрон нестабилен, распадается на протон и электрон в среднем за 15,3 мин. Источниками нейтронов являются ядерные реакторы, ядерные взрывы, ускорители заряженных частиц, нейтроны легко проникают в ядра и захватываются ими. Нейтроны вызывают деление тяжелых ядер. ■

атом может перейти из стационарного состояния с меньшим запасом энергии в стационарное состояние с большим запасом энергии. Из любого возбужденного состояния атом самопроизвольно может переходить в основное состояние; этот переход сопровождается излучением фотонов. Время жизни атомов в возбужденных состояниях обычно не превышает $10^{-8} - 10^{-7}$ сек.

Движение электрона в атоме возможно лишь по стационарным круговым орбитам, радиусы которых определяются выражением:

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{4\pi m e^2},$$

где n — целое число, h — постоянная Планка, ϵ_0 — электрическая постоянная вакуума, m — масса электрона, e — элементарный электрический заряд.

Подставляя в последнее выражение значения $n = 1, 2, \dots$, можно вычислить радиусы первой, второй и всех последующих стационарных круговых орбит электронов в атоме.

Внутреннее строение атома изучать непосредственно невозможно, так как его размеры недоступны прямому наблюдению, поэтому о структуре атома можно судить по излучению атомов под воздействием нагрева или внешнего электрического поля. Изучение спектров излучения позволяет получить данные о внутренней структуре атома — для каждого атома характерны особенности спектра. Бор предположил, что каждая спектральная линия соответствует мгновенному переходу атома из одного квантового состояния в другое, которое характеризуется меньшим значением энергии. ■

Все атомы одного химического элемента обладают одинаковым зарядом атомного ядра. При одинаковом заряде ядра атомы обладают одинаковым строением электронных оболочек и потому имеют одинаковый набор возможных энергетических состояний и переходов между ними. Излучение и поглощение фотонов происходит при переходах атомов из одного стационарного состояния в другое. Энергия фотона, поглощаемого атомом при переходе из нормального состояния с энергией E_1 в возбужденное состояние с энергией E_n , равна энергии фотона, излучаемого атомом при обратном переходе, так как и в том и в другом случае она равна разности энергий атома в этих двух состояниях:

$$h\nu = E_n - E_1.$$

Для лучшего понимания дальнейшего материала остановимся подробнее на атоме.

В 1913 году английский физик Генри Мозли (1887–1915) по спектрам рентгеновского излучения, испускаемого атомами при облучении вещества потоком электронов высокой энергии, определил заряды ядер атомов различных химических элементов:

$$q = eZ,$$

где e — элементарный электрический заряд, Z — порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева. Отсюда следует, что порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева определяется числом положительных элементарных зарядов в ядре любого атома химического элемента или числом электронов в оболочке нейтрального атома.



Рис. 74. Схема линейчатого спектра.

Так как ядро атома химического элемента с порядковым номером Z в таблице Менделеева содержит Z элементарных положительных зарядов, то, соответственно, ядро любого из атомов этого химического элемента должно быть составлено из Z одинаковых частиц, каждая из которых обладает элементарным положительным зарядом. Такой частицей мог быть протон — ядро самого легкого из атомов: атома водорода. Но если бы атомные ядра состояли только из протонов, то ядро атома химического элемента с порядковым номером Z должно было обладать электрическим зарядом:

$$q = Ze$$

и массой

$$m = Zm_p.$$

Но в действительности такого не наблюдается (к примеру, масса ядра атома кислорода не в 8 раз больше массы ядра атома водорода, а в 16 раз). Проблема состава атомного ядра была решена только после открытия в 1932 году английским физиком Джеймсом Чедвиком (1891–1974) частицы, не имеющей электрического заряда и обладающей массой, примерно равной массе протона. Эту частицу называли нейтроном.

После открытия нейтрона советским физиком Дмитрием Дмитриевичем Иваненко и немецким физиком Вернером Гейзенбергом была выдвинута гипотеза о протонно-нейтронном строении ядра. Согласно этой гипотезе, все ядра состоят из протонов и нейтронов. Число протонов в ядре равно порядковому номеру элемента в таблице Менделеева и обозначается знаком Z . Число нейтронов в ядре обозначается знаком N . Общее число протонов и нейтронов в ядре обозначается знаком A и называется **массовым числом**:

$$A = Z + N.$$

Атомные ядра с одинаковыми Z , но различными A называются **изотопами**. В среднем на каждое значение Z приходится около трех стабильных изотопов. Кроме стабильных изотопов большинство элементов имеют и нестабильные изотопы, для которых характерно ограниченное время жизни. Ядра с одинаковым массовым числом A называются **изобарами**.

Из-за разного числа нейтронов ядра различных изотопов одного химического элемента обладают разными массами и могут отличаться по физическим свойствам, например по способности к радиоактивному распаду. Из-за одинакового заряда ядра атомы разных изотопов одного химического элемента имеют одинаковое строение электронных оболочек и поэтому обладают одинаковыми химическими свойствами.

Обозначается изотоп символом химического элемента X с указанием слева вверху массового числа A и слева внизу — числа протонов Z в атомном ядре:

$${}_Z^A X.$$

Силы притяжения, связывающие протоны и нейтроны в атомном ядре, называют **ядерными силами**. Существует и другое название этого взаимодействия — **сильное взаимодействие**.

Протон и нейтрон по способности к сильному взаимодействию не отличаются друг от друга, поэтому в ядерной физике их часто рассматривают как одну частицу — **нуклон** — в двух различных состояниях. Нуклон в состоянии без электрического заряда называется нейтроном, нуклон в состоянии с электрическим зарядом называется протоном.



Вернер Гейзенберг (1901–1976).

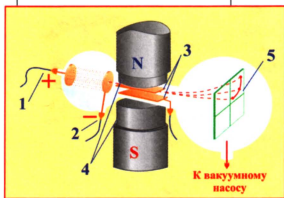


Рис. 75. Масс-спектрограф: 1 — анод, 2 — катод, 3 — пластины конденсатора, 4 — полюса магнита, 5 — экран или фотопластинка.

Все атомные ядра разделяются на стабильные и нестабильные. Стабильными являются те атомные ядра, которые обладают минимальным запасом полной энергии среди всех ядер, в которые данное ядро могло бы самопроизвольно превратиться. Свойства стабильных ядер остаются неизменными неограниченно долго. Нестабильные же ядра испытывают различного рода превращения. ■

Основные свойства ядерных сил объясняются тем, что нуклоны обмениваются между собой частицами, масса которых больше массы электрона примерно в 200 раз. Такие частицы были обнаружены экспериментально в 1947 году. Они получили название **пи-мезонов** (или **пионов**).

Измерение массы атомного ядра с помощью специальных приборов (так называемых масс-спектрографов) показало, что масса любого ядра, содержащего Z протонов и N нейтронов, меньше суммы масс Z свободных протонов и N нейтронов. Таким образом, в соответствии с законом взаимосвязи массы и энергии, следует, что полная энергия свободных протонов и нейтронов должна быть больше полной энергии составленного из них ядра. Минимальная энергия $\Delta E_{\text{св}}$, которую нужно затратить для разделения атомного ядра на составляющие его нуклоны, называется **энергией связи ядра**:

$$\Delta E_{\text{св}} = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - m_{\text{я}} c^2,$$

где Z — число протонов, m_p — масса протона, N — число нейтронов, m_n — масса нейтрона, $m_{\text{я}}$ — масса ядра, c — скорость света.

При соединении протонов и нейтронов в атомное ядро происходит освобождение энергии — освобождаемая энергия равна энергии связи ядра $\Delta E_{\text{св}}$. Эта энергия освобождается за счет работы сил ядерного притяжения между нуклонами.

Энергия связи, отнесенная к массовому числу A , называется **средней энергией связи нуклона** в атомном ядре (энергия связи на один нуклон). Энергия связи приблизительно постоянна для всех стабильных ядер и примерно равна 8 МэВ. Исключением является область легких ядер, где средняя энергия связи растет от нуля ($A=1$) до 8 МэВ для ядра ^{12}C .

Аналогично энергии связи на один нуклон можно ввести энергию связи ядра относительно других составных его частей.

В отличие от средней энергии связи нуклонов количество энергии связи нейтрона и протона изменяется от ядра к ядру.

Часто вместо энергии связи используют величину, называемую **дефектом массы** и равную разности масс и массового числа атомного ядра. ■

Атомное ядро, испускающее γ -кванты, α -, β - или другие частицы, называется **радиоактивным ядром**. В природе существует 272 стабильных атомных ядра. Все остальные ядра радиоактивны и называются **радиоизотопами**. ■

Альфа-распад. Энергия связи ядра характеризует его устойчивость к распаду на составные части. Если энергия связи ядра меньше энергии связи продуктов его распада, то это означает, что ядро может самопроизвольно (спонтанно) распадаться. При альфа-распаде α -частицы уносят почти всю энергию и только лишь 2% ее приходится на вторичное ядро. При альфа-распаде массовое число изменяется на 4 единицы, а атомный номер на две единицы.

Начальная энергия α -частицы составляет 4—10 МэВ. Поскольку α -частицы имеют большую массу и заряд, длина их свободного пробега в воздухе невелика. Так, например, длина свободного пробега в воздухе α -частиц, испускаемых ядром урана, равна 2,7 см, а испускаемых радием — 3,3 см. ■

Бета-распад. Это процесс превращения атомного ядра в другое ядро с изменением порядкового номера без изменения массового числа. Раз-

личают три типа бета-распада: электронный, позитронный и захват орбитального электрона атомным ядром. Последний тип распада принято также называть K -захватом, поскольку при этом наиболее вероятно поглощение электрона с ближайшей к ядру оболочки (так называемой K -оболочки). Период полураспада β -активных ядер изменяется в очень широких пределах.

Число бета-активных ядер, известных в настоящее время, составляет около полутора тысяч, но только 20 из них являются естественными бета-радиоактивными изотопами. Все остальные получены искусственным путем. Непрерывное распределение по кинетической энергии испускаемых при распаде электронов объясняется тем обстоятельством, что наряду с электроном испускается и антинейтрино. Если бы не было антинейтрино, то электроны имели бы строго определенный импульс, равный импульсу остаточного ядра. Резкий обрыв спектра наблюдается при значении кинетической энергии, равной энергии бета-распада. При этом кинетические энергии ядра и антинейтрино равны нулю и электрон уносит всю энергию, выделяющуюся при реакции. ■

При электронном распаде остаточное ядро имеет порядковый номер на единицу больше исходного, при сохранении массового числа. Это означает, что в остаточном ядре число протонов увеличилось на единицу, а число нейтронов, наоборот, стало меньше:

$$N = A - (Z + 1).$$

При **позитронном распаде** сохраняется полное число нуклонов, но в конечном ядре на один нейтрон больше, чем в исходном. Таким образом, позитронный распад может быть интерпретирован как реакция превращения внутри ядра одного протона в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино.

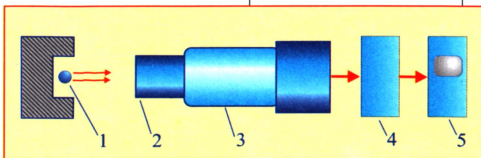
К электронному захвату относится процесс поглощения атомом одного из орбитальных электронов своего атома. Поскольку наиболее вероятен захват электрона с орбиты, наиболее близко расположенной к ядру, то с наибольшей вероятностью поглощаются электроны K -оболочки. Поэтому этот процесс называется также K -захватом.

С гораздо меньшей вероятностью происходит захват электронов с других оболочек. После захвата электрона с K -оболочки происходит ряд переходов электронов с орбиты на орбиту, образуется новое атомное состояние и испускается рентгеновский квант. ■

Гамма-распад. Стабильные ядра находятся в состоянии, отвечающем наименьшей энергии. Это состояние, как уже упоминалось, называется основным. Однако путем облучения атомных ядер различными частицами или высокоэнергетическими протонами им можно передать определенную энергию и, следовательно, перевести в состояние, отвечающее большей энергии. Переходя через некоторое время из возбужденного состояния в основное, атомное ядро может испустить или частицу, если энергия возбуждения достаточно высока, или высокоэнергетическое электромагнитное излучение — γ -квант.

Прибор для измерения спектра гамма-излучения называется гамма-спектрометр. В большинстве гамма-спектрометров энергия и интенсивность потока γ -квантов определяются не непосредственно, а измерением энергии и интенсивности потока заряженных частиц, возникающих в результате взаимодействия гамма-излучения с веществом. Основными характеристиками гамма-спектрометра являются эффективность и разрешающая способность. Эффективность определяется вероятностью образования вторичной частицы и вероятностью ее регистрации. Разрешающая способность характеризует возможность разделения двух гамма-линий, близких по энергии. В сцинтилляционных гамма-спектрометрах вторичные электроны возникают при взаимодействии γ -квантов со сцинтиллятором (веществом, в котором вторичные электроны возбуждают флюоресценцию). Световая вспышка преобразуется в электрический импульс с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), причем величина сигнала, создаваемого ФЭУ, пропорциональна энергии электрона и, следовательно, связана с энергией γ -кванта. Для измерения распределения сигналов по амплитуде используются специальные электронные устройства — амплитудные анализаторы (см. рис. 76). ■

Рис. 76. Схема гамма-спектрометра: 1 — источник γ -квантов, 2 — сцинтилляционный кристалл, 3 — ФЭУ, 4 — усилитель электрических импульсов, 5 — амплитудный анализатор импульсов.





Энрико Ферми (1901–1954).

Энрико Ферми — великий итальянский физик, внесший большой вклад в развитие современной теоретической и экспериментальной физики. Принимал деятельное участие в создании основ квантовой физики. В 1934 году создал количественную теорию β -распада, основанную на предположении о том, что β -частицы испускаются одновременно с нейтрино. В 1934–1938 годах вместе с сотрудниками изучал свойства нейтронов и практически заложил основы нейтронной физики. Ферми впервые наблюдал искусственную радиоактивность, вызванную бомбардировкой нейтронами ряда элементов (в т.ч. урана), открыл явление замедления нейтронов и создал теорию этого явления, за что в 1938 году получил Нобелевскую премию. В декабре 1942 года Ферми впервые удалось осуществить ядерную цепную реакцию в построенном им первом в мире ядерном реакторе, где в качестве замедлителя нейтронов использовался графит, в качестве горючего — уран. Последние годы жизни занимался физикой высоких энергий. ■

Поскольку возбужденное ядро находится в дискретных энергетических состояниях, то и гамма-излучение характеризуется линейчатым спектром. Распад большого количества ядер любого радиоактивного изотопа подчиняется одному закону, носящему название **закона радиоактивного распада** и выражающегося формулой:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}},$$

где N_0 — начальное количество радиоактивных ядер в момент времени, с которого начинаются наблюдения ($t=0$). Число ядер, не испытывших распада до некоторого произвольного момента времени t , обозначается N . Символом T обозначена постоянная величина, зависящая от типа радиоактивного изотопа. Эта постоянная называется **периодом полураспада**. Через промежуток времени, равный периоду полураспада, исходное количество радиоактивных ядер уменьшается вдвое. ■

Явление деления тяжелых атомных ядер на два осколка было открыто О. Ганом и Ф. Штрассманом в 1939 году при изучении взаимодействия нейтронов различных энергий и ядер урана. Несколько позже, в 1940 году, советские физики К.А. Петряк и Г.И. Флеров обнаружили самопроизвольное (спонтанное) деление ядер урана. При спонтанном делении, вызванном нейтронами, как правило, образуются асимметричные осколки, отношение масс которых примерно равно 3:2.

При реакции деления выделяется очень большая энергия. Энергия деления высвобождается в виде кинетической энергии ядер-осколков, кинетической энергии испускаемых ядрами-осколками электронов, γ -квантов, нейтрино, нейтронов.

Основная часть энергии деления приходится на энергию ядер-осколков, поскольку под действием кулоновских сил отталкивания они приобретают большую кинетическую энергию. Основная часть энергии деления выделяется в виде кинетической энергии ядер-осколков.

Замечательным и чрезвычайно важным свойством реакции деления является то, что в результате деления образуется несколько нейтронов. Это обстоятельство позволяет создать условия для поддержания стационарной или развивающейся во времени цепной реакции деления ядер. Действительно, если в среде, содержащей делящиеся ядра, один нейтрон вызывает реакцию деления, то образующиеся в результате реакции нейтроны могут с определенной вероятностью вызвать деление ядер, что может привести при соответствующих условиях к развитию неконтролируемого процесса деления. Число вторичных нейтронов непостоянно для всех тяжелых ядер и зависит как от энергии вызвавшего деление нейтрона, так и от свойств ядра-мишени. Среди нейтронов деления кроме так называемых мгновенных нейтронов, испускаемых за 10–15 секунд после процесса деления, есть также и запаздывающие нейтроны. Они испускаются в течение нескольких минут с постепенно убывающей интенсивностью. Мгновенные нейтроны составляют более 99% полного числа нейтронов деления, а их энергия заключена в широком диапазоне: от тепловой энергии до энергии, приблизительно равной 10 МэВ.

Запаздывающие нейтроны испускаются возбужденными ядрами образующихся после бета-распада продуктов деления — ядер-предшественников. Поскольку испускание нуклонов возбужденным ядром происходит мгновенно, то время испускания запаздывающего нейтрона после акта деления будет определяться постоянной распада ядра-предшественника. ■

В результате деления тяжелых ядер образуются, как правило, два ядра-осколка с различной массой. В среднем отношение масс легких и тяжелых осколков равно 2:3. Как правило, ядра-осколки имеют большой избыток нейтронов и поэтому неустойчивы относительно бета-распада. Массовые числа A продуктов деления меняются от 72 до 161, а атомные номера — от 30 до 65. Вероятность симметричного деления на два осколка с приблизительно равными массами составляет всего 0,04%. Доля симметричного деления возрастает по мере увеличения энергии первичного нейтрона, вызывающего деление атомного ядра.

Различные частицы (нейтроны, протоны, электроны, γ -кванты и т.д.) могут взаимодействовать с атомными ядрами. Характер взаимодействия зависит от энергии частиц, их типа и свойств атомного ядра. Для оценки вероятности взаимодействия вводится величина, называемая **микроскопическим сечением взаимодействия**. Физический смысл ее состоит в следующем. Пусть пучок нейтронов интенсивностью N_0 падает на мишень, состоящую из одного слоя ядер. Число ядер на единице поверхности равно M . Предположим, что при прохождении пучка через такой слой часть нейтронов поглотится в нем, а N' нейтронов пройдет через этот слой. Тогда вероятность взаимодействия одного нейтрона с одним атомным ядром будет равна:

$$\sigma = \frac{N_0 - N'}{N_0 M}.$$

Это и есть микроскопическое сечение, представляющее собой эффективную площадь поперечного сечения атомного ядра, попав в которое налетающая частица вызывает ядерную реакцию или испытывает рассеяние. В процессе экспериментальных исследований энергетической зависимости сечения взаимодействия частиц и различных атомных ядер было обнаружено, что при определенных энергиях значения сечений резко возрастают, а при дальнейшем увеличении энергии снова уменьшаются. Это явление называется **резонансом**.

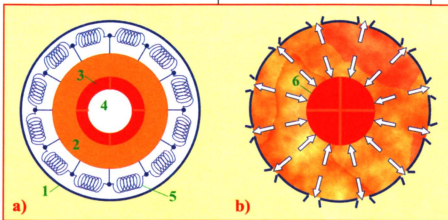


Рис. 77. Атомное оружие импlosionного типа представляет собой полую сферу из делящегося материала, окруженную слоем обычного взрывчатого вещества. При детонации наружной сферы внутренняя сжимается до критической массы, и происходит ядерный взрыв: а) — до взрыва, б) — после взрыва. Условные обозначения: 1 — корпус, 2 — обычное взрывчатое вещество, 3 — докритическая масса Pu-239, 4 — воздушная полость и зазоры, 5 — провода системы детонации, 6 — критическая масса.



Энергия, выделяемая при делении ядер, не всегда используется во благо.

Термин «радиоактивность» был предложен в 1898 году Марией Склодовской-Кюри. Первая единица измерения радиоактивности была названа в честь супругов-ученых «кюри». Радиоактивность в 1 кюри составляет 1 г радия. Существует такое определение данной единицы: 1 кюри — активность такого количества радиоактивного вещества, в котором происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду.

Радиоактивность можно измерять в различных единицах — в беккерелях, кюри, рентгенах, резерфордах, греях и т.д., а мощность излучения — в этих же единицах, отнесенных к единице времени (секунде, часу, суткам, неделе, месяцу, году). Рассмотрим основные единицы измерения радиоактивности, чаще других используемые в практической деятельности.

1 рентген — это такая доза рентгеновских (или гамма) лучей, при которой в 1 см³ воздуха образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов (или в 1 г воздуха — $1,61 \cdot 10^{12}$ пар ионов).

1 бэр (биологический эквивалент рентгена) — доза любого излучения, которая производит такое же биологическое действие, как рентгеновское или гамма-излучение в 1 рентген. ■

Степень облучения измеряют еще в радах. Слово «рад» образовано от английского «radiation absorbed dose» — «поглощенная доза излучения». 1 рад — это такое излучение, при котором каждый килограмм массы вещества (скажем, человеческого тела) поглощает 0,01 Дж энергии (или 1 г массы поглощает 100 эргов).

Для обычных практических расчетов можно считать, что рентгены, рады и бэры равны между собой: 1 рентген = 1 рад = 1 бэр. ■

Нейтроны по энергии принято делить на следующие группы: **быстрые нейтроны**, с энергией 1–2 МэВ и скоростью примерно 10^7 м/с, и **тепловые нейтроны**, находящиеся в тепловом равновесии с ядрами среды, имеющие энергию 0,005–0,2 эВ и движущиеся со скоростью теплового движения (около $2 \cdot 10^3$ м/с). Выделяют также **промежуточные** и **надтепловые** нейтроны.

При взаимодействии нейтрона и ядер могут протекать следующие реакции: упругое рассеяние, неупругое рассеяние, радиационный захват, деление. Вероятность протекания определенной реакции характеризуется микроскопическими сечениями. В зависимости от энергии нейтрона сечения могут изменяться. Так, в области быстрых нейтронов сечение радиационного захвата примерно в 100 раз меньше сечения захвата тепловых нейтронов. Сечение упругого рассеяния, как правило, почти постоянное для энергии выше 1 эВ. ■

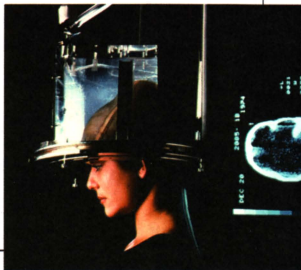
Необходимо отметить, что радиоактивные излучения губительны для живых клеток. Механизм этого воздействия на ткани живого организма заключается в процессах возбуждения и ионизации атомов и молекул среды. Возбужденные атомы и ионы обладают высокой химической активностью, поэтому при попадании в клетки организма они провоцируют появление новых химических соединений, чуждых здоровому организму. Под действием ионизирующей радиации разрушаются отдельные сложные молекулы и элементы клеточных структур.

β-частицы обладают различными пробегами в веществе. Проникающую способность β-частиц различных радиоактивных изотопов обычно характеризуют минимальной толщиной слоя вещества, полностью поглощающего все β-частицы. К примеру, слой алюминия толщиной 3,5 мм полностью защищает от потока β-частиц с максимальной энергией частиц 2 МэВ.

α-частицы обладают значительно большей массой, чем β-частицы. Поэтому столкновения с электронами атомных оболочек оказывают незначительное влияние на траекторию движения α-частиц, и они движутся почти прямолинейно. Пробеги α-частиц в веществе очень малы — например, в мягких тканях человека длина пробега α-частиц составляет сотые доли миллиметра. Благодаря небольшой проникающей способности альфа- и бета-излучения обычно не представляют опасности при внешнем облучении. Плотная одежда может поглотить значительную часть β-частиц и совсем не пропускает α-частицы. Однако при попадании внутрь человеческого организма с пищей, водой и воздухом или при загрязнении радиоактивным веществом поверхности тела альфа- и бета-излучения могут причинить человеку серьезный вред.

γ-кванты и нейтроны, в отличие от α- и β-частиц, не обладают электрическими зарядами и потому

Достижения ученых в области атомной и ядерной физики широко используются во многих отраслях, в том числе и в медицине. Например, с помощью томографа исследуется и диагностируется головной мозг человека.



имеют гораздо больший пробег в веществе — пути пробега γ -квантов и нейтронов в воздухе измеряются сотнями метров, в твердом веществе — десятками сантиметров и даже метрами. γ -кванты, как и заряженные частицы, взаимодействуют в основном с электронными оболочками атомов. При прохождении вблизи атомного ядра γ -квант может превратиться в пару частиц электрон-позитрон. Вторичные электроны, возникающие в результате взаимодействия гамма-излучения с веществом, производят ионизацию и возбуждение атомов среды. Проникающая способность гамма-лучей увеличивается с ростом энергии γ -квантов и уменьшается с увеличением плотности вещества-поглотителя.

Нейтроны при движении в веществе с электронными оболочками атомов не взаимодействуют и возбуждать или ионизировать атомы не могут. При столкновении с атомными ядрами они испытывают рассеяние или вызывают ядерные реакции с выходом из ядра заряженных частиц и γ -квантов. Таким образом, конечными результатами взаимодействия с веществом любого вида ядерного излучения являются ионизация и возбуждение атомов среды. Кроме того, в некоторых случаях при осуществлении ядерных реакций возможно образование новых элементов или изотопов.

Гамма-лучи и потоки нейтронов — наиболее проникающие виды ионизирующих излучений, поэтому при внешнем облучении они представляют для человека наибольшую опасность.

Особенно чувствительны к воздействию подобных излучений клетки, находящиеся в состоянии быстрого роста и размножения. Это обстоятельство используется для лечения раковых опухолей.

В терапии применяют радиоактивные препараты, испускающие гамма-лучи, так как последние без заметного ослабления проникают внутрь организма. При не слишком больших дозах облучения раковые клетки гибнут, тогда как организму больного не причиняется существенного ущерба. Однако необходимо отметить, что радиотерапия рака, как, впрочем, и любой другой метод лечения этого заболевания, далеко не всегда приводит к излечению.

Чрезмерно большие дозы радиоактивных излучений вызывают тяжелые заболевания животных и человека (так называемая **лучевая болезнь**) и могут привести к смерти. В очень малых дозах радиоактивные излучения, главным образом альфа-лучи, оказывают стимулирующее действие на организм. С этим связан целебный эффект радиоактивных минеральных вод, содержащих небольшие количества радия или радона. Мерой воздействия любого вида ядерного излучения на вещество является **поглощенная доза излучения**. Доза излучения есть отношение энергии, переданной ионизирующим излучением веществу, к массе вещества.

Единица поглощенной дозы получила название **грэй** (Гр):

$$1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}.$$

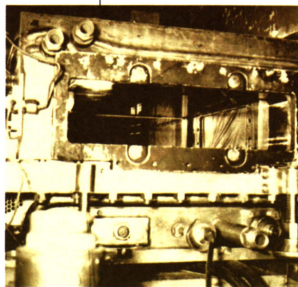
Также может быть использована и единица **рад**:

1 рад = 0,01 Гр.

Открытие явления радиоактивности и результаты опытов Резерфорда убедительно показали, что атомы не являются неделимыми простейшими частицами. Как было установлено, они состоят из электронов, протонов и нейтронов. Первое время частицы, из которых построены атомы, считались неделимыми. Поэтому их называли **элементарными**

Нейтрино называется незаряженная элементарная частица, которая испускается одновременно с электроном или позитроном при бета-распаде атомного ядра. Нейтрино крайне слабо взаимодействует с ядрами и практически не взаимодействует с электронами, кроме того, не производит заметной ионизации среды. ■

Камера Вильсона — прибор, позволяющий регистрировать элементарные частицы.



Информация об элементарных частицах получается либо в результате экспериментов с космическими лучами, либо с помощью построенных ускорителей. Ускоритель частиц — это установка, в которой с помощью электрических и магнитных полей получают направленные пучки электронов, протонов, ионов и других заряженных частиц с энергиями, значительно превышающей тепловую энергию. В процессе ускорения повышаются скорости частиц, причем нередко до значений, близких к скорости света.

В зависимости от типа ускоряемых частиц различают протонные и электронные ускорители. Кроме того, ускорители бывают кольцевые и линейные. ■

В кольцевых ускорителях вдоль всего кольца, в котором движутся разогнанные заряженные частицы и из которых откачан воздух, стоят электромагниты. Чем сильнее магнитное поле, тем более энергичные частицы могут быть удержаны внутри кольца (камеры). Разгоняются частицы при помощи электрического поля в ускоряющих промежутках, которые расположены вдоль кольца. В кольцевом ускорителе, где частица может многократно пролететь вдоль кольца, пока не наберет нужную энергию, электрическое поле может быть не очень сильным. В линейном ускорителе, напротив, ускоряющие электрические потенциалы должны быть предельно высокими, потому что частица должна набрать всю свою энергию за один пролет (линейные ускорители используются также и для получения высокоэнергичных пучков ионов и ядер). ■

частицами. Однако в последующем, при ближайшем рассмотрении, оказалось, что термин «элементарная частица» довольно условен. Одна из этих частиц — нейтрон — в свободном состоянии существует в среднем лишь около 15 мин, а затем самопроизвольно распадается на протон, электрон и нейтрино. Однако считать протон, электрон и нейтрино «настоящими» элементарными частицами, а нейтрон «ненстоящей» элементарной частицей нельзя, так как каждая из этих частиц при взаимодействии с другими частицами и атомными ядрами может превращаться в другие частицы.

Параметров, определяющих свойства частиц, довольно много. Важнейшими из них являются масса частицы, ее электрический заряд, спин и время жизни. ■

СПИНОМ называется величина, дающая количественную характеристику вращательного движения частицы. Спин частицы (механический момент) у различных частиц может иметь различные значения, но все частицы одного типа имеют абсолютно одинаковые спины.

Попробуем подробнее рассмотреть огромное семейство «элементарных» частиц (в настоящее время их известно более 200). Но прежде чем начать рассмотрение элементарных частиц, необходимо вспомнить типы взаимодействий.

Как мы уже упоминали, в настоящее время известно четыре типа взаимодействий: сильные, электромагнитные, слабые и гравитационные взаимодействия.

Наиболее известными из них (и заметными в обыденной жизни) являются электромагнитные и гравитационные взаимодействия, наблюдающиеся в макроскопическом мире. Гравитационные взаимодействия существуют между всеми известными частицами, однако при этом они настолько слабы, что не поддаются экспериментальному обнаружению. В макроскопическом мире гравитационные взаимодействия большого количества частиц, составляющих массу тела, складываются и порождают силу гравитации, которая является основной силой во Вселенной. Электромагнитные взаимодействия происходят

между всеми заряженными частицами. Именно они ответственны за все химические реакции, а также за образование всех атомных и молекулярных структур. Сильные взаимодействия удерживают вместе протоны и нейтроны внутри ядра. Они порождают ядерную силу — самую мощную из всех известных современной науке сил. Так, например, электроны удерживаются поблизости от атомного ядра при помощи электромагнитной силы, обладающей энергией примерно в десять электрон-вольт, в то время как ядерная сила, связывающая нейтроны внутри ядра, использует энергию, рав-

Для того чтобы разогнать элементарные частицы до скоростей, близких к скорости света, требуется огромная энергия — так, например, выглядит зал питания магнитов синхрофазотрона.



ную десяткам миллионов электрон-вольт — особым единицам для измерения энергии на субатомном уровне. ■

Поначалу считали, что сильное взаимодействие присуще только нуклонам (протонам и нейтронам), а переносчиком взаимодействия считали элементарные частицы — **пионы**. Последние бывают как заряженные, так и нейтральные. Кроме того, считалось, что электроны не участвуют в сильных взаимодействиях. ■

Как оказалось впоследствии, нуклоны — не единственные частицы, которые принимают участие в сильных взаимодействиях. К сильно взаимодействующим частицам относится подавляющее большинство известных частиц. Из более чем 200 частиц только лишь несколько не могут принять участия в сильных взаимодействиях (как и их античастицы). Это фотон и несколько лептонов. Не так давно был обнаружен лептон, получивший обозначение «тау» (греческая буква τ). Так же как электрон и мюон, он может существовать в двух зарядовых состояниях, а поскольку его масса превосходит массу электрона почти в 3500 раз, он получил название **тяжелого лептона**. Существование нейтрино, который принимал бы участие только во взаимодействиях с τ -лептоном, было обосновано только теоретически и остается до сих пор не доказанным экспериментально. ■

Постепенно обнаруживались все новые элементарные частицы, и наконец появилась потребность хоть как-то их классифицировать. Частицы стали подразделять на **адроны** (тяжелые частицы) и **лептоны** (легкие частицы). Семейство лептонов включает электрон, мюон и их нейтрино. Эти частицы не участвуют в сильных взаимодействиях — последние свойственны адронам, примерами которых служат протон и нейтрон.

Со временем семейство адронов пополнилось большим количеством новых членов. Как выяснилось, они сами состоят из других частиц — так называемых **кварков**. До сих пор не удалось наблюдать отдельные кварки в свободном состоянии. Согласно современным теориям, кварки могут существовать только в комбинациях, образующих обычные частицы. Взаимодействие кварков осуществляется посредством **глюонов**. Это взаимодействие и удерживает кварки в связанном состоянии внутри обычных частиц.

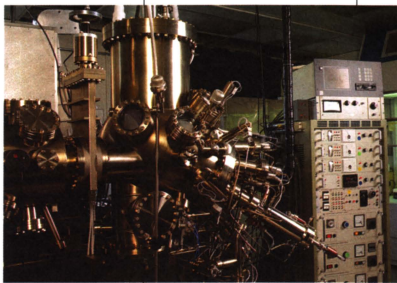
Масса протона примерно в 1836 раз больше массы электрона. Нейтрон немного массивнее, чем протон. Есть частицы с массами порядка массы протона и даже больше. Все они получили название **барионы**. Пионы примерно в 270 раз массивнее электрона, они принадлежат к семейству **мезонов**. Сперва предполагали, что и барионы, и мезоны состоят из кварков, причем протон и нейтрон состоят каждый из трех кварков, а мезоны — из двух. Однако теперь считается, что для объяснения всех наблюдаемых свойств элементарных частиц необходимо привлечь еще несколько кварков с другими характеристиками.

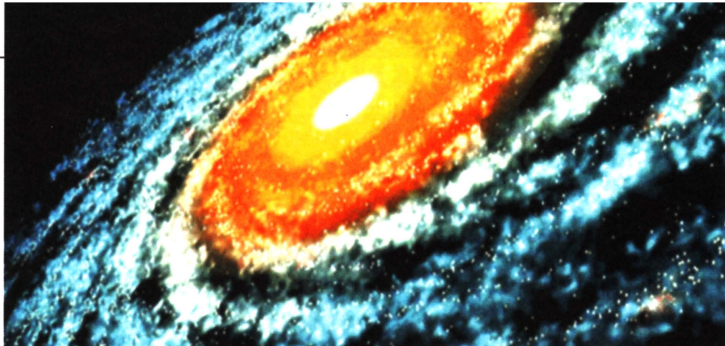
Необходимо отметить, что между мезонами и барионами существует довольно много различий. Важ-

Ускоритель частиц — установка, в которой с помощью электрических и магнитных полей получают направленные пучки электронов, протонов, ионов и других заряженных частиц с энергией, значительно превышающей тепловую энергию. ■

В процессе ускорения повышаются скорости частиц, причем нередко до значений, близких к скорости света. В настоящее время многочисленные малые ускорители применяются в медицине (радиационная терапия), а также в промышленности (например, для ионной имплантации в полупроводниках). Крупные же ускорители применяются главным образом в научных целях — для исследования субъядерных процессов и свойств элементарных частиц. ■

С помощью таких приборов и устройств исследуются тайны микрокосмоса.





Частицы самых высоких энергий из других галактик способны преодолевать огромные расстояния в десятки миллионов световых лет и больше.

нейшее из них заключается в том, что все барионы имеют античастицы, в то время как мезоны могут сами выступать в роли своих античастиц. ■

Лептоны (как и адроны) принимают участие во взаимодействиях четвертого типа — в слабых взаимодействиях. Впервые это взаимодействие было открыто при изучении распада нейтрона (процесс β -распада) на протон, электрон и антинейтрино. Эти взаимодействия очень слабы и действуют на таком коротком расстоянии, что не могут удерживать частицы друг возле друга. Три остальные разновидности взаимодействий порождают силы притяжения: сильные взаимодействия — внутри атомных ядер, электромагнитные взаимодействия — внутри атомов и молекул, а гравитационные взаимодействия — между планетами, звездами и целыми галактиками. Слабые взаимодействия проявляются в единственной форме — в форме некоторых столкновений частиц, а также их распада (сюда, например, относится и бета-распад, упоминавшийся выше).

Все взаимодействия между адронами проявляются в обмене другими адронами. Сильные взаимодействия действуют только на очень небольших расстояниях из-за того, что в соответствующих им обменных процессах участвуют тяжелые адроны. Сильные взаимодействия становятся заметны только при том условии, что расстояние между взаимодействующими частицами не превышает нескольких диаметров частицы. В противоположность сильным, электромагнитные взаимодействия, проявляющиеся в обменах фотонами, не имеющими массы, могут происходить между сколь угодно далекими частицами, вследствие чего проявления электрических и магнитных сил заметны в мире больших измерений. Считается, что гравитационные взаимодействия тоже осуществляются при помощи обмена особыми частицами — «**гравитонами**», однако слабость этих взаимодействий настолько велика, что гравитоны до сих пор не были обнаружены учеными, хотя повода сомневаться в их существовании нет.

В силу того что слабые взаимодействия становятся возможными только при том условии, что расстояние между частицами предельно невелико — гораздо меньше, чем при сильных взаимодействиях, считается, что эти взаимодействия осуществляются при помощи обмена очень тяжелыми ча-

Поль Дирак (1902–1984).



стищами. По-видимому, эти частицы выполняют роль, аналогичную роли фотона при электромагнитных взаимодействиях, и единственное их отличие от последнего заключается в том, что они гораздо тяжелее.

Во многих процессах столкновений, находящихся применение в физике высоких энергий, часто имеют место и сильные электромагнитные, и слабые взаимодействия, в результате чего возникают длинные цепочки последовательных превращений частиц. Частицы, первоначально принимавшие участие в столкновении, аннигилируют, образуя несколько новых частиц, которые тоже проходят несколько стадий распада, прежде чем превратиться в устойчивые частицы. ■

И наконец, два слова об уже упоминавшихся античастицах. В 1928 году английский физик Поль Дирак пришел к выводу, что наряду с электронами должны существовать частицы с такой же массой, но с противоположным по знаку зарядом. Позднее, в 1933 году, Фредерик и Ирен Жолио-Кюри обнаружили что γ -квант с энергией, большей энергии покоя электрона и позитрона $E = 2mc^2 \approx 1,02$ МэВ, при прохождении вблизи атомного ядра может превратиться в пару электрон-антиэлектрон. Эти частицы (антиэлектроны) назвали **позитронами**. Позитроны — это античастицы по отношению к электронам. Электрон и позитрон не могут долго существовать вместе: они аннигилируют с образованием фотонов. В 1955 году на новом ускорителе в Беркли Э. Сегре, О. Чемберлен и другие обнаружили антипротоны, рожденные в столкновении протонов с ядрами медной мишени. До этого протон с отрицательным зарядом долго и безуспешно разыскивался в космических лучах. В 1956 году был открыт и антинейтрон. Сейчас известно уже множество частиц, и почти всем им соответствуют античастицы.

Частицы и античастицы имеют одинаковую массу, время жизни, спин, но различаются знаками всех зарядов: электрического, барионного, лептонного и т.д. Это следует из общих принципов **квантовой теории поля** и подтверждается надежными экспериментальными данными.

Для фотона, не имеющего электрического заряда, античастицей будет сам фотон. Фотон может спонтанно распадаться на позитрон и электрон, а последние, в свою очередь, могут объединиться и образовать фотон при обратном процессе аннигиляции.

В сильных и электромагнитных взаимодействиях имеется полная симметрия между частицами и античастицами: если возможен какой-то процесс с частицами, то возможен и имеет те же характеристики аналогичный процесс с соответствующими античастицами. Подобно тому, как протоны и нейтроны благодаря сильному взаимодействию связываются в ядра, из соответствующих античастиц будут образовываться антиядра.

При изучении античастиц исследователи обнаружили их полную **временную** симметрию. Говоря простым языком, это означает, что для каждого физического процесса существует точно такой же процесс, развертывающийся в обратном направлении во времени, в котором принимают участие античастицы. Это открытие полностью разрушило представление о линейности времени (так называемая «стрела времени» — от прошлого к будущему через настоящее). ■

Каждую секунду на площадку в один квадратный метр через границу земной атмосферы в направлении земной поверхности влетают из космоса более 10000 релятивистских (то есть движущихся со скоростями, близкими к скорости света) заряженных частиц. Они называются космическими лучами. Происхождение большей части космических лучей, десятки миллионов лет блуждающих в межзвездной среде, связано с грандиозными взрывами звезд (так называемых «сверхновых») в нашей Галактике. Частицы самых высоких энергий, возможно, приходят к нам из других, более активных галактик.

Больше всего в составе космических лучей протонов, то есть ядер водорода, — около 90% от числа всех частиц. Примерно в 10 раз меньше ядер гелия. На долю всех остальных ядер приходится около 1%. В космических лучах уже обнаружена большая часть элементов таблицы Менделеева. Химический состав космических лучей дает нам информацию о процессах «сотворения» элементов — нуклеосинтеза — в Галактике. ■

Ускоритель в лаборатории Ферми.



Физические постоянные и их единицы в СИ (Международной системе единиц)

Наименование величины	Наименование	Обозначение		Единица	Определение
		международное	русское		
Основные величины					
Длина	Метр	m	м	Метр равен расстоянию, проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за 1/299792458 долю секунды	
Масса	Килограмм	kg	кг	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма	
Время	Секунда	s	с	Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133	
Сила электрического тока	Ампер	A	А	Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н	
Термодинамическая температура	Кельвин	K	К	Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды	
Количество вещества	Моль	mol	моль	Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц	
Сила света	Кандела	cd	кд	Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср	
Дополнительные единицы					
Плоский угол	РадIAN	rad	рад	РадIAN равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу	
Телесный угол	Стерadian	sr	ср	Стерadian равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы	
Производные единицы пространства и времени					
Площадь	Квадратный метр	m ²	м ²	Квадратный метр равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м	
Объем	Кубический метр	m ³	м ³	Кубический метр равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м	

Продолжение. Физические постоянные и их единицы в СИ

Наименование величин	Наименование	Единица		
		Обозначение		Определение
		международное	русское	
Скорость	Метр в секунду	м/с	м/с	Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м
Ускорение	Метр на секунду в квадрате	м/с ²	м/с ²	Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки возрастает на 1 м/с
Период	Секунда	s	с	
Частота периодического процесса	Герц	Hz	Гц	Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с происходит один цикл периодического процесса
Производные единицы механических величин				
Плотность	Килограмм на кубический метр	кг/м ³	кг/м ³	Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м ³ равна 1 кг
Импульс (количество движения)	Килограмм-метр в секунду	кг·м/с	кг·м/с	Килограмм-метр в секунду равен импульсу (количеству движения) тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с
Сила	Ньютон	N	Н	Ньютон равен силе, сообщающей телу массой 1 кг ускорение 1 м/с ² в направлении действия силы
Момент силы, момент пары сил	Ньютон-метр	N·m	Н·м	Ньютон-метр равен моменту силы, создаваемому силой 1 Н относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы
Импульс силы	Ньютон-секунда	N·s	Н·с	Ньютон-секунда равна импульсу силы, создаваемой силой 1 Н, действующей в течение времени 1 с
Давление	Паскаль	Pa	Па	Паскаль равен давлению (механическому напряжению), вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м ²
Работа, энергия	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен работе, совершаемой при перемещении точки приложения силы 1 Н на расстояние 1 м в направлении действия силы
Мощность	Ватт	W	Вт	Ватт равен мощности, при которой совершается работа 1 Дж за время 1 с
Поверхностное напряжение	Ньютон на метр	N/m	Н/м	Ньютон на метр равен поверхностному натяжению, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности

Продолжение. Физические постоянные и их единицы в СИ

Наименование величины	Наименование	Обозначение		Единица	Определение
		международное	русское		
Производные единицы тепловых величин					
Температура Цельсия	Градус Цельсия	°C	°C	По размеру градус Цельсия равен кельвину	
Количество теплоты	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж	
Теплоемкость	Джоуль на кельвин	J/K	Дж/К	Джоуль на кельвин равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 К при подведении к системе количества теплоты 1 Дж	
Удельная теплоемкость	Джоуль на килограмм-кельвин	J/(kg·K)	Дж/(кг·К)	Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К	
Производные единицы величин молекулярной физики					
Молярная масса	Килограмм на моль	kg/mol	кг/моль	Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг	
Производные единицы электрических и магнитных величин					
Количество электричества, электрический заряд	Кулон	C	Кл	Кулон равен количеству электричества, проходящего через поперечное сечение при токе силой 1 А за время 1 с	
Напряженность электрического поля	Вольт на метр	V/m	В/м	Вольт на метр равен напряженности однородного электрического поля, при которой между двумя точками, находящимися на линии напряженности поля на расстоянии 1 м, создается разность потенциалов 1 В	
Электрическое напряжение, электрический потенциал; разность электрических потенциалов; электродвижущая сила	Вольт	V	В	Вольт равен электрическому напряжению на участке электрической цепи, при котором в участке происходит постоянный ток силой 1 А и затрачивается мощность 1 Вт	
Электрическая емкость	Фарад	F	Ф	Фарад равен электрической емкости конденсатора, при которой заряд 1 Кл создает на конденсаторе напряжение 1 В	
Магнитная индукция	Тесла	T	Тл	Тесла равен магнитной индукции, при которой магнитный поток сквозь поперечное сечение площадью 1 м² равен 1 Вб	
Магнитный поток	Вебер	Wb	Вб	Вебер равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества 1 Кл	

Окончание. Физические постоянные и их единицы в СИ

Наименование величины	Наименование	Единица		
		Обозначение		Определение
		международное	русское	
Индуктивность	Генри	Н	Гн	Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб
Электрическое сопротивление	Ом	Ω	Ом	Ом равен электрическому сопротивлению участка электрической цепи, при котором постоянный ток силой 1 А вызывает падение напряжения 1 В
Удельное электрическое сопротивление	Ом·метр	$\Omega \cdot \text{м}$	Ом·м	Ом·метр равен удельному электрическому сопротивлению вещества, при котором участок выполненной из этого вещества электрической цепи длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м ² имеет сопротивление 1 Ом
Производные единицы величин молекулярной физики				
Энергия излучения	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен энергии излучения, эквивалентной работе 1 Дж
Поток излучения, мощность излучения	Ватт	W	Вт	Ватт равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт
Световой поток	Люмен	lm	лм	Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд
Световая энергия	Люмен-секунда	lm·с	лм·с	Люмен-секунда равна световой энергии, соответствующей световому потоку 1 лм, излучаемому или воспринимаемому в течение 1 с
Яркость	Кандела на квадратный метр	cd/m ²	кд/м ²	Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м ² при силе света 1 кд
Светимость	Люмен на квадратный метр	lm/m ²	лм/м ²	Люмен на квадратный метр равен светимости поверхности площадью 1 м ² , испускающей световой поток 1 лм
Освещенность	Люкс	lx	лк	Люкс равен освещенности поверхности площадью 1 м ² при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм
Производные единицы величин ионизирующих излучений				
Поглощенная доза излучения	Грэй	Gy	Гр	Грэй равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия любого ионизирующего излучения 1 Дж
Мощность поглощенной дозы излучения	Грэй в секунду	Gy/s	Гр/с	Грэй в секунду равен мощности поглощенной дозы излучения, при которой за время 1 с облученным веществом поглощается доза излучения 1 Дж/кг
Активность нуклида в радиоактивном источнике	Беккерель	Bq	Бк	Беккерель равен активности нуклида, при которой за время 1 с происходит один акт распада

БОЛЬШАЯ СЕРИЯ ЗНАНИЙ

Брилев Д. В.

Физика

Выпускающий редактор *О. Медведская*

Технический редактор *Н. Лисицына*

Внешнее оформление *Д. Шишко*

Подготовка оригинал-макета ООО «Навигатор букс»

Б87 Большая серия знаний. **Физика** / – М.: ООО «ТД «Издательство Мир книги»,
2006. – 128 с.; ил.

ББК 22.3

Подписано в печать 15.04.2006 .

Формат 84x108^{1/16}.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Ньютон».

Печ. л. 8.

Доп. тираж 25 000 экз.

Заказ № 6249.

ООО «ТД «Издательство Мир книги»,
111024, Москва, ул. 2-я Кабельная, д. 2, стр. 6

Отдел реализации:

Телефон: (495) 974-29-76, 974-29-75.

Факс: (495) 742-85-79

E-mail: commerce@mirknigi.ru

ОАО "Тверской полиграфический комбинат", 170024, г. Тверь, пр-т Леонова, 5.
Телефон: (4822) 44-52-03, 44-50-34, Телефон/факс: (4822) 44-42-15
Интернет/Home page - www.tverprk.ru Электронная почта (E-mail) - sales@tverprk.ru



ISBN 5-486-01370-6



9795486001370 6

Большая Серия Знаний

ФИЗИКА

Физика — наука, изучающая наиболее общие закономерности природы, строение и законы движения материи.

Физические закономерности пронизывают всю нашу жизнь. Мы живем в огромном мире, подчиняющемся определенным законам. Эти законы существуют помимо человека — они были, есть и будут независимо от того, знаем мы о них или нет.

Человечество же, в силу своей неуемной жажды к познанию, всегда будет стремиться познать законы природы, с тем чтобы в дальнейшем применить их. На этом пути человека ждет много трудностей и преград, но, несмотря ни на что, пылкий человеческий разум все равно стремится приподнять завесу непознанного.

Какие еще тайны скрываются за ней?

Кто знает...

